1ª EDIÇÃO

MATOLOGIA

Estudos **sobre** plantas **daninhas.**

ORGANIZAÇÃO

ARTHUR
Arrobas Martins
Barroso

AFONSO
Takao Murata

Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas
(Brazilian Weed Science Society)
SBCPD

UFPR
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MATOLOGIA

Estudos **sobre** plantas **daninhas.**

PREFÁCIO

Á área da Biologia e Manejo de Plantas Daninhas tem importância fundamental no agronegócio do Brasil. As plantas daninhas através da competição e alelopatia provocam danos expressivos à produção afetando a lucratividade dos empreendimentos agrícolas.

Historicamente no Brasil atravessamos períodos com uso de controle manual e mecânico através de diversos modelos de cultivadores. Os trabalhos técnicos na década de 50 tratavam de levantamentos da flora infestante, salientando a importância do controle dessas espécies.

Os primeiros trabalhos científicos com controle químico das plantas daninhas surgiram após a entrada da primeira amostra de 2,4-D em 1946. Pesquisas foram conduzidas pelos Instituto Agronômico de Campinas, Instituto Biológico e pelos Institutos de Pesquisa e Experimentação Agrícola do Ministério da Agricultura.

No ano de 1956 já havia um número representativo de pesquisadores e Engenheiros Agrônomos de empresas, sendo realizado o 1° Seminário Brasileiro de Herbicidas e Ervas Daninhas na Escola Nacional de Agronomia do Rio de Janeiro. A partir desta data foram realizados os seminários e posteriormente congressos a cada 2 anos. A Sociedade Brasileira de Herbicidas e Ervas Daninhas foi criada em 1963.

Na área de ensino foram realizados na década de 60 alguns cursos intensivos sobre herbicidas, mas o primeiro curso oficial como disciplina de graduação em Engenharia Agronômica foi criado na ESALQ/USP em 1969 como disciplina optativa no último ano pelo Prof. Paulo Nogueira de Camargo juntamente com os colaboradores Giorgio de Marinis, Odilon Saad, Reinaldo Forster, Aldo Alves e Paulo Haag. O nome do curso era Controle Químico de Plantas Daninhas. Eu cursei esta disciplina em 1969 estando no 5° ano do Curso de Engenharia Agronômica da ESALQ/USP. Deste curso surgiu o Texto Básico de Controle Químico de Plantas Daninhas que até hoje serve de consulta para alguns temas básicos na área.

Posteriormente outras Universidades criaram cursos regulares na graduação como U.F. de Viçosa, UNESP-Jaboticabal, U.F de Lavras e outras. Ainda hoje são encontrados poucos textos sobre o assunto no Brasil. O crescimento do uso de herbicidas no Brasil exige conhecimentos apropriados para entender como se comportam no ambiente e como atuam nas plantas daninhas com seletividade para

as plantas cultivadas.

O livro que está sendo disponibilizado apresenta capítulos de muita importância para o manejo sustentável das plantas daninhas. São 16 capítulos desde a ecologia da população e comunidades de plantas daninhas até o manejo das principais plantas daninhas resistentes no Brasil. Também apresenta os mecanismos de ação dos herbicidas e o manejo em culturas geneticamente modificadas.

É importante salientar a colaboração de jovens pesquisadores que contribuem nesta edição. Portanto o livro estará disponível aos cursos de graduação e pós-graduação nas diferentes universidades do Brasil e aos profissionais que atuam na área de Biologia e Manejo de Plantas Daninhas. Hoje é muito importante considerar os conceitos básicos fundamentais para a adoção de um manejo integrado e não focar exclusivamente no controle químico das plantas daninhas.

Prof. Ricardo Victoria Filho
Prof. Titular – Departamento de Produção Vegetal – ESALQ/USP
Área de Biologia e Manejo de Plantas daninhas.

M433

Matologia: estudos sobre plantas daninhas / Arthur Arrobas Martins Barroso (Organizador); Afonso Takao Murata (Organizador). -- Jaboticabal: Fábrica da Palavra, 2021.
547 p.

Bibliografia
ISBN 978-65-00-16757-3

1. Plantas Daninhas. 2. Herbicidas. 3. Transgênicos. 4. Resistência à Herbicidas. 5. Fitossociologia. I. Título.

CDU 632.51

SUMÁRIO

Introdução à ciência das plantas daninhas 07

Ecologia de populações e comunidades de plantas daninhas 38

Índices fitossociológicos aplicados na ciência e na gestão das estratégias de controle de plantas daninhas 60

Interferência: conhecer para usá-la a nosso favor 106

Métodos de controle de plantas daninhas 145

Mecanismos de ação de herbicidas 170

Formulações e misturas de herbicidas em tanque 205

Comportamento de herbicidas no ambiente 253

Seletividade, hormesis e fisiologia dos herbicidas nas plantas 295

Resistência de plantas daninhas aos herbicidas 324

Identificação de resistência das plantas daninhas aos herbicidas 365

Controle de espécies resistentes ao glifosato 392

Tecnologia de aplicação para herbicidas 428

Ecotoxicologia dos herbicidas: aplicações e dinâmica ambiental 450

Estresse hídrico no manejo de plantas daninhas 476

Manejo de organismos geneticamente mofificados tolerantes a herbicidas 506

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO À CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS

André Felipe Moreira Silva[1]
Ana Lígia Giraldeli[1]
Gustavo Soares da Silva[1]
Lucas da Silva Araújo[2]
Alfredo Júnior Paiola Albrecht[3]
Leandro Paiola Albrecht[3]
Ricardo Victória Filho[4]

[1]Doutor(a) em Fitotecnia, Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (USP - ESALQ), [2]Doutorando em Fitotecnia, USP - ESALQ, [3]Doutor em Agronomia, Professor, Universidade Federal do Paraná - UFPR; [4]Doutor em Agronomia, Professor, USP - ESALQ.

1 INTRODUÇÃO

1.1 O termo planta-daninha

Ao longo da história, diversos foram, e ainda são, os termos utilizados para definir o que é uma "planta daninha". Além do próprio termo, são utilizados: plantas infestantes, plantas invasoras, plantas voluntárias, plantas espontâneas, ervas daninhas ou, ainda, termos mais populares e menos acadêmicos, como: mato, tiguera, inço, juquira, entre outros tantos. Em geral, todos estes termos referem-se à indesejabilidade de determinada espécie vegetal em uma atividade humana, sobretudo nas agrícolas.

> Plantas daninhas são indesejadas em virtude dos problemas que causam à produtividade agrícola, aos custos de produção, à manutenção da integridade de reservas ambientais, ao aumento dos riscos com acidentes em rodovias, ferrovias e hidrovias, à integridade de ambientes aquáticos e à geração de energia elétrica, entre outras importantes interferências (PITELLI, 2015).

Contudo, embora todos estes termos sejam utilizados para designar as plantas que afetam negativamente as atividades humanas, existem algumas diferenças entre estes conceitos. O termo plantas invasoras, de maneira genérica, refere-se a plantas não nativas, plantas que foram introduzidas em um novo ambiente, ou ainda para plantas exóticas. Segundo Espínola et al. (2007), toda espécie introduzida é potencialmente invasora, mas nem toda é, inclusive alguns autores relatam a "invasão" como sendo benéfica em algumas situações. Outro ponto é que muitas plantas daninhas são consideradas espécies nativas. Portanto, o termo "planta invasora" não é o mais adequado. Outro termo que deve ser evitado é "erva daninha" (BRIGHENTI; OLIVEIRA, 2011), uma vez que cerca de 20% das espécies vegetais daninhas não são herbáceas, sendo arbustivas ou arbóreas (LORENZI, 2008).

Por fim, Pitelli (2015) recomenda o uso do termo "planta-daninha", por entender ser o melhor termo que expressa o conceito de interferência nas atividades humanas. Com a ressalva de que a vegetação que infesta áreas agrícolas e

de pecuária pode ser designada por terminologia utilizada em ecologia, sendo uma comunidade infestante o conjunto de plantas-daninhas que habitam determinado ambiente.

Alguns outros termos mais amplos podem ser destacados, como "praga quarentenária", que é toda espécie que, quando presente, mesmo sob controle permanente, constitui ameaça à economia agrícola do país ou da região. As pragas quarentenárias são agrupadas em A1 (pragas exóticas não presentes no país ou na região) e A2 (já presentes no país ou na região, porém com disseminação localizada e submetidas a programa oficial de controle). No Brasil, são consideradas pragas quarentenárias ausentes as espécies *Cirsium arvense*, uma espécie de cardo e *Striga spp*, uma espécie parasita.

Outra definição, a de "pragas prioritárias", representa aquelas espécies de interesse econômico ou social, não necessariamente enquadradas como pragas quarentenárias, para as quais haja regulamentação e ações em âmbito local. As pragas prioritárias possuem prioridade no registro de agrotóxicos.

A seguir (Tabela 1), é a apresentada lista atualizada de plantas daninhas que estão entre as pragas de importância econômica de maior risco fitossanitário para as culturas agrícolas no Brasil. Esta relação é atualizada ano a ano (MAPA, 2018).

Tabela 1. Plantas daninhas prioritárias e principais culturas impactadas.

Praga	Culturas
Lolium multiflorum (azevém)	Soja, Algodão, Feijão e Trigo
Conyza bonariensis (buva)	
Digitaria insularis (capim-amargoso)	
Amaranthus palmeri (caruru-palmeri)	
Digitaria insularis	Eucalipto e Pínus
Digitaria horizontalis (capim-colchão)	
Panicum maximum (capim-colonião)	
Urochloa decumbens (capim-braquiária)	
Urochloa brizantha (capim-braquiária)	

Existem ainda plantas daninhas cujas sementes são proibidas ou toleradas na produção e comercialização de sementes forrageiras, olerícolas, flores, ornamen-

tais, medicinais, e outras, definidas por legislação específica (IN 45 e 46 do MAPA). São proibidas, por exemplo, pela IN 46, a presença de sementes das seguintes espécies: *Cuscuta spp*. (cuscuta), *Cyperus rotundus* (tiririca), *Eragrotis plana* (capim-annoni), *Hippobroma longiflora* (arrebenta-bio), *Rottboelia exaltata* (capim-camalote), *Rumex acetosella* (linguinha-de-vaca), *Sorghum halepense* (capim-massambará) e *Wedelia glauca* (margarida). Outras sementes podem ser toleradas, porém em quantidades conhecidas, por exemplo, a espécie *Cyperus esculentus* (tiririca) que pode ter três sementes em amostras de sementes do tipo básica. Por definição federal, estas espécies são definidas como nocivas (espécie de difícil erradicação no campo ou remoção no beneficiamento, prejudicial à cultura ou seu produto) (MAPA, 2013).

1.2 Breve histórico da Ciência das Plantas Daninhas no Brasil

> Com a presença de grande número de técnicos oficiais e de firmas especializadas, foi fundada, em São Paulo, a 8 de fevereiro p.p., em reunião no Instituto Biológico, a SOCIEDADE BRASILEIRA DE HERBICIDAS E ERVAS DANINHAS, com o objetivo de estudar e combater as ervas más (SBHED, 1963).

Esta é a transcrição exata de texto publicado na Revista de Agricultura sobre a fundação da Sociedade Brasileira de Herbicidas e Ervas Daninhas, em oito de fevereiro de 1963, que teve como seu primeiro presidente, Moyses Kramer. Antes mesmo da fundação da SBHED, que mudaria de nome para o atual Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas (SBCPD) em 1995, já haviam sido realizados quatro edições do Seminário Brasileiro de Herbicida e Ervas Daninhas, o primeiro em 1956. A seguir, são apresentados estes e outros fatos históricos sobre a SBCPD e a Ciência das Plantas Daninhas no Brasil (Tabela 2).

Tabela 2. Alguns fatos históricos sobre a Ciência das Plantas Daninhas no Brasil.

Ano	Fato histórico
1945	Liberação no Brasil do herbicida 2,4-D, sob o nome comercial Mata Mato®
1956	I Seminário Brasileiro de Herbicida e Ervas Daninhas
1963	Fundação da SBHED
1978	Fundação da revista Planta Daninha
	Liberação no Brasil do herbicida glyphosate, sob o nome comercial Roundup®
1980	Mudança do Seminário para Congresso
1993	Criação do Boletim Informativo
	Primeiros casos relatados de plantas daninhas resistentes a herbicidas:
1993	*Bidens pilosa* (picão-preto) (resistente a inibidores da ALS)
1995	*Euphorbia heterophylla* (amendoim-bravo ou leiteiro) (resistente a inibidores da ALS)
	XX Congresso da SBCPD. Mudança no nome para SBCPD
1998	Aprovação pelo CTNBio da soja transgênica tolerante a glyphosate (soja RR), primeiro evento transgênico aprovado no Brasil
2000	Fundação da Revista Brasileira de Herbicidas
2005	Fim do embargo a soja RR, liberação do cultivo em lavouras comerciais
2015	I Campeonato Brasileiro de Herbologia, hoje em sua quinta edição.
2020	XXXI Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas

Fonte: Adaptado de Concenço et al. (2014), Heap (2019), SBCPD (2019).

2 ASPECTOS GERAIS DAS PLANTAS DANINHAS

2.1 Aspectos positivos

Os aspectos positivos das plantas daninhas nem sempre são conhecidos. Dentre os benefícios que essas plantas podem proporcionar, estão: (1) a proteção do solo contra erosão; (2) fixação de nitrogênio no solo; (3) valor ornamental; (4) uso medicinal; (5) importância apícola; (6) óleos essenciais; (7) fontes de vitaminas

e sais minerais, podendo em alguns casos serem incorporadas à alimentação; (8) forrageiras; (9) fibras; (10) coberturas de casas e abrigos; (11) fitorremediação de agrotóxicos ou metais pesados, entre outros.

Algumas espécies são importantes por serem úteis na produção de mel, seja por fornecerem pólen ou néctar, como: *Ipomoea asarifolia* (corda-de-viola), *Sida rhombifolia* (guanxuma) (LOPES et al., 2016), *Alternanthera tenella* (apaga-fogo), *Commelina erecta* (trapoeraba), *B. pilosa*, *Bidens subalternans* (picão-preto), *Emilia sonchifolia* (falsa-serralha), *Vernonia polyanthes* (assa-peixe), *Merremia aegyptia*, *Momordica charantia* (melão-de-São-Caetano), *E. heterophylla*, *Ricinus communis* (mamona) e *Spermacoce verticillata* (vassourinha-de-botão) (SOARES FILHO et al., 2016). Espécies da família Fabaceae são importantes fixadoras de nitrogênio, como as plantas: *Crotalaria spp*., *Stylosanthes spp. e Desmodium spp*. (pega-pega). Outras espécies podem ser utilizadas na adubação verde, como *Canavalia ensiformes* e crotalária (BRIGHENTI; OLIVEIRA, 2011).

As folhas de *A. tenella* são usadas como diurético, antipirético e antisséptico do trato urinário e contra gripes. As folhas novas de *Amaranthus spinosus* (caruru-de-espinho) são utilizadas como laxante e indicadas contra doenças venéreas e inflamações urinárias. A infusão de folhas novas de *Amaranthus viridis* (caruru-de--mancha) tem propriedades anti-inflamatórias das doenças urinárias e venéreas. A planta *Ageratum conyzoides* (mentrasto) é usada contra dores de estômago e de intestino (AGRA et al., 2007). A espécie *Acanthospermum hispidum* (carrapicho-de-carneiro) é usada contra diarreias e verminoses, *M. charantia* para inflamações externas, *Leonotis nepetaefolia* para inflamações, as sementes de *Senna occidentalis* (fedegoso) para trombose e *Phyllanthus niruri* indicada no combate de complicações renais (CORDEIRO; FÉLIX, 2014).

Muitas espécies são consideradas ornamentais, por exemplo: *A. tenella*, *C. erecta*, *M. aegyptia*, *Portulaca oleraceae* (beldroega) e *I. grandiflora* (SOARES FILHO et al., 2016). Outras plantas têm uso alimentar e são conhecidas como plantas alimentícias não convencionais (PANC), como *Amaranthus hybridus* (caruru), *E. sonchifolia*, *Oxalis corniculata* (azedinha), *Solanum americanum* (maria-pretinha) (POLETTO et al., 2015), *O. latifolia e Taraxacum officinale* (dente-de-leão), *Rumex obtusifolius* (língua--de-vaca) e *M. charantia* (POLESI et al., 2017).

Ainda algumas plantas daninhas são consideradas indicadoras de dife-

rentes condições do solo. Diferentes espécies adaptam-se a diferentes condições edafoclimáticas, assim como aos fatores de manejo. Por exemplo, *Cenchrus echinatus* (capim-carrapicho) e *Sida spp.* (guanxuma) são plantas indicadoras para solo compactado. Ou ainda *Galinsoga parviflora* (picão-branco ou botão-de-ouro) pode indicar solo com excesso de nitrogênio (N) e deficiente em micronutrientes, principalmente Cobre (Cu) (LEITE et al., 2016a, b).

2.2 Aspectos negativos

Mesmo possuindo aspectos positivos, muitas espécies vegetais podem interferir negativamente nas culturas. Os prejuízos causados pelas plantas, então, daninhas, podem ser diretos ou indiretos. Diretos devido a pressões ambientais (competição por recursos do meio como água, luz, nutrientes e espaço, alelopatia, entre outros), através da redução da produtividade vegetal ou animal, não certificação de sementes, demanda adicional de água, menor qualidade do produto colhido. Indiretos, por serem hospedeiras de pragas, doenças e nematoides, por impedirem tratos culturais ou a colheita, por ferir trabalhadores, causar intoxicações, abrigar animais peçonhentos, obstruir equipamentos e canais de irrigação, reduzir eficiência no uso da área e aumentar os custos com controle de doenças e pragas (SILVA et al., 2010; CONCENÇO et al., 2014).

Entre os prejuízos diretos, um dos mais destacados é a redução em produtividade de cultivos comerciais, devido à competição por recursos do meio ou ainda pela liberação de compostos alelopáticos (a ser discutido em maiores detalhes em capítulo específico). Na cultura da soja, a presença das espécies *Urochloa plantaginea* (capim-marmelada), *D. horizontalis*, *Ipomoea triloba* (corda-de-viola), *E. heterophylla*, *Amaranthus deflexus* (caruru-rasteiro), *Commelina benghalensis* (trapoeraba), *Richardia brasiliensis* (poaia-branca), *B. pilosa e Raphanus raphanistrum* (nabiça) reduziram a produtividade da cultura em 52% (SILVA et al., 2015). Em cana-de-açúcar, *C. rotundus*, *P. oleraceae* e t*iguera de Arachis hypogaea* reduziram em 20% a produtividade (KUVA et al., 2000). Na cultura do milho, a produtividade foi 20% menor na presença das plantas daninhas *U. plantaginea*, *D. horizontalis*, *Eleusine indica* (capim-pé-de-galinha), *R. raphanistrum*, *Chenopodium album* (ançarinha-branca), *G. parviflora*,

Amaranthus retroflexus (caruru-gigante), *E. heterophylla e S. rhombifolia* (KOZLOWSKI et al., 2009).

Em feijão-caupi, as plantas daninhas *A. tenella*, *C. rotundus*, *Digitaria ciliaris* (capim-colchão), *E. indica* e *Mollugo verticillata* (capim-tapete) reduziram a produtividade da cultura em 46% (CORRÊA et al., 2015). Em batata-doce (*I. batatas*), a presença das plantas daninhas *Richardia grandiflora*, *A. conyzoides* e *E. indica* reduziram a produtividade em 53,5% do Clone, 6, 65% da variedade Sergipana e 69,3% do Clone 14 (CAVALCANTE et al., 2017).

Entre as principais plantas daninhas nas lavouras de grãos no Brasil estão *Conyza sp*. e *D. insularis*, causando muitos prejuízos diretos às lavouras. Estudo de Gazziero et al. (2012) indicou que a convivência de 4 a 6 plantas m^2 de *D. insularis* com a cultura da soja já é suficiente para reduzir a produtividade em 44%. Enquanto, segundo Albrecht et al. (2018), uma planta de *Conyza spp*. m^{-2} pode reduzir entre 12 e 14,6% a produtividade da soja.

Estimativas indicam que as plantas daninhas impactam em 9% de redução na produtividade das culturas, em escala mundial (OERKE, 2006). Esta redução gera prejuízos, não só pela redução em produtividade, mas também de tempo, devido aos custos para o controle das plantas daninhas. Em uma análise para o cenário brasileiro, Adegas et al. (2017) verificaram que, para *Conyza spp*, o custo do controle seria de R$ 95,40 ha^{-1}, passando para R$ 126,20 no caso de a planta ser resistente ao glyphosate. Enquanto isso, os custos totais para controle de plantas daninhas em lavouras de soja aumentam para R$ 479,50, em situações de infestação mista de *Conyza sp*. e *D. insularis* (área estimada em 2,7 milhões de hectares).

Diretamente, algumas espécies, quando presentes em pastagens, podem intoxicar os animais, como: *Palicourea marcgravii* (D'OLIVEIRA et al., 2018), *Asclepias curassavica* (TOKARNIA et al., 2001), *Senecio brasiliensis* (maria-mole) (ILHA et al., 2001), *I. asarifolia* (CARVALHO et al., 2014). Outras são tóxicas para humanos e animais, como *A. hybridus*, *R. communis e Urtica dioica* (urtiga) (SOARES FILHO et al., 2016). Brighenti e Oliveira (2011) também citam a competição estabelecida entre as plantas daninhas e a forrageira, o que diminui a capacidade de lotação dos pastos. Além disso, algumas plantas, como Solanum aculeatissimum e Acacia plumosa, são espécies espinhosas que podem ferir os animais.

As plantas tóxicas a animais de interesse zootécnico são divididas em

plantas que causam "morte súbita" (*P. marcgravii*), plantas que causam distúrbios gastrintestinais (*R. communis*), hepatotóxicas (*Crotalaria retusa*), nefrotóxica (*Thiloa glaucocarpa*), plantas que afetam o sistema nervoso central (*I. asarifolia*), fotossensibilizantes (*Urochloa spp.*), ação radiomimética (*Pteridium aquilinum*), que causam anemia hemolítica (*Indigofera suffruticosa*), cianogênicas (*Sorgum vulgare*), que acumulam nitratos e nitritos (*Pennisetum purpureum*), que promovem distúrbios reprodutivos (*Mimosa tenuiflora*), que afetam pele e anexos (*Leucaena leucocephala*) (leucena) e pneumotóxicas (*Ipomoea batatas + Fusarium solani* – batata-doce-mofada) (BARBOSA et al., 2007).

Pensando na qualidade de produção, sementes de *B. pilosa* junto à fibra do algodão, *C. echinatus* junto ao feno, *A. hispidum* aderidas à lã e tubérculos de tiririca desenvolvendo-se dentro de tubérculos de batata, são prejudiciais (SILVA et al., 2010). Espécies que possuem crescimento volúvel, como *I. grandifolia*, além de competirem por recursos com a cultura (prejuízo direto), podem interferir nas práticas culturais e causar problemas durante a colheita, provocando embuchamento da máquina (prejuízo indireto) (OLIVEIRA; FREITAS, 2008).

Espécies de plantas daninhas aquáticas prejudicam o uso da água nas propriedades rurais, reduzem a vida útil dos reservatórios, elevam a perda de água através da transpiração, em altas densidades podem comprometer a piscicultura, pois reduzem o teor de oxigênio na água. Quando presentes em canais de irrigação e drenagem, reduzem o fluxo de água, elevando as perdas por infiltração e evapotranspiração, elevando os custos com a manutenção (PITELLI, 1987).

Segundo Martins et al. (1999), dentre as principais plantas daninhas aquáticas, destacam-se as do gênero: *Eichhornia*, *Pistia*, *Echinochloa*, *Polygonum*, *Salvinia*, *Brachiaria*, *Typha*, *Egeria e Cyperus*, sendo as aquáticas flutuantes as que causam os mais sérios e difundidos problemas no mundo. A principal planta daninha aquática no Brasil e no mundo é *Eichhornia crassipes* (aguapé).

Outra interferência direta das plantas daninhas é o parasitismo. Alguns exemplos são a erva-de-passarinho (*Phoradendron rubrum*) em citros e a erva-de-bruxa (*Striga lutea*) em milho, sendo que esta última é a pior invasora para milho e ainda não ocorre no Brasil. Há ainda a redução do valor da terra por espécies de plantas daninhas, como *C. rotundus e Artemisia verlotorum* (losna). Estas, quando presentes em áreas com culturas que apresentam pequena capacidade competitiva,

como, por exemplo, as olerícolas, têm o custo de controle muito elevado, tornando-se inviáveis economicamente (SILVA et al., 2010).

As plantas daninhas também podem causar prejuízos diretos às culturas através da liberação de compostos alelopáticos. Shaukat et al. (2003) identificaram que o extrato aquoso de plântulas de *Conyza canadensis* (buva) inibiu totalmente a germinação de tomate. Outro exemplo é a planta *V. polyanthes* com atividade alelopática sobre *Urochloa sp*. (SOUZA FILHO et al., 1996). Muitos outros são os exemplos de plantas daninhas que liberam compostos alelopáticos, que podem vir a causar prejuízos diretos às plantas cultivadas.

Indiretamente, as plantas daninhas podem hospedar pragas, doenças e nematoides. A espécie *Diabrotica speciosa* foi encontrada em *C. echinatus*, *Amaranthus spp*., *E. heterophylla*, *R. raphanistrum*, *B. pilosa*, *S. oleraceus*, *D. insularis*, *Sida sp*., *Parthenium hysterophorus* (losna-branca), *Leonurus sibiricus* (rubim) e *C. benghalensis* (OLIVERIA; RANDO, 2017). Bellé et al. (2017) confirmaram a hospedabilidade de 17 espécies de plantas daninhas ao nematoide *Meloidogyne incognita*. As espécies *U. brizantha e Sorghum arundinaceum* (falso-massambará) são hospedeiras do SCMV, agente causal do mosaico-comum em milho e sorgo no Brasil (SOUZA et al., 2016).

3 AGRESSIVIDADE DAS PLANTAS DANINHAS

3.1 Plantas daninhas vs plantas cultivadas

As plantas daninhas são naturalmente adaptadas ao ambiente em que estão inseridas e possuem capacidade de crescer rapidamente, principalmente quando comparadas às plantas cultivadas, que foram selecionadas e melhoradas geneticamente com foco na produtividade. Dessa forma, a habilidade competitiva das plantas daninhas em relação às cultivadas é maior. Cury et al. (2011), em estudo de competição de plantas daninhas com três cultivares de feijão, relataram que ambas as cultivares, em competição com *A. spinosus* e *U. plantaginea*, apresentaram menor acúmulo de massa seca nas diferentes partes (raiz, caule e folhas) das plantas de feijão. Resultados semelhantes foram relatados por Manabe et al. (2015) na cultura

do feijão, onde a competição das plantas de feijão com *B. pilosa* e *U. plantaginea* reduziram a massa seca total e, em competição com *A. retroflexus* e *B. pilosa*, ocorreu diminuição da área foliar.

Diversas características conferem agressividade das plantas daninhas sobre as plantas cultivadas, como tolerância a estresses (bióticos e abióticos), rápido crescimento, liberação de compostos alelopáticos e com destaque para as estratégias reprodutivas. Estas lhes proporcionam maior desenvolvimento, ocupação do solo e propagação de novas gerações.

As plantas daninhas em geral possuem elevada produção de dissemínulos, produção de propágulos (rizomas, bulbos, estolão, etc.), manutenção da viabilidade dos dissemínulos em condições adversas, capacidade de germinar e emergir em grandes profundidades, desuniformidade de germinação devido à dormência, reprodução alternativa, facilidade na dispersão dos sementes e rápido crescimento inicial (SILVA et al., 2007).

Por outro lado, muitas vezes, as exigências nutricionais acabam sendo superiores para uma planta cultivada encerrar seu ciclo se comparada a uma planta daninha. Neste caso, a presença de espécies cultivadas na safra anterior, no meio de uma nova plantação, irá acarretar perdas elevadas de produção. Estas plantas podem ser denominadas como tigueras, plantas voluntárias ou plantas daninhas comuns. Atualmente, a presença de tais plantas tem levantado preocupações também pela possibilidade restrita de controle frente às resistências induzidas a herbicidas em cultivos geneticamente modificados, como as plantas tolerantes ao glyphosate.

3.2 Crescimento e desenvolvimento

As plantas daninhas competem com as plantas cultivadas pelos recursos do meio, como água, luz, nutrientes, espaço, polinizadores, dentre outros, para seu crescimento e desenvolvimento. A competição ocorre quando a oferta de um dos recursos necessários ao desenvolvimento das plantas tem disponibilidade menor que a demanda. Há também uma adaptação ao manejo e às condições locais, como manejo do solo, variações climáticas e diversidade de espécies do banco de sementes.

Locais onde ocorre intenso cultivo do solo, com preparo de solo e ciclos de

cultivos consecutivos, ocorrem plantas daninhas ruderais. Plantas ruderais são plantas muito bem adaptadas a ambientes humanos, sejam ambientes urbanos (calçadas, margens de ruas) ou ambientes rurais (lavouras) (LORENZI, 2008; CATTANI, 2009).

As plantas ruderais são agressivas, com rápido crescimento, arbustivas de porte baixo e investem sua energia em se reproduzirem. São muito competitivas na absorção de água e nutrientes, e eficientes na utilização da luz. Não necessitam investir energia no desenvolvimento de raízes e da parte aérea, pois em sua maioria desenvolvem-se em áreas de elevada fertilidade e ausência de déficit hídrico (COBB; READE, 2010). Seu ciclo é curto, pois estrategicamente têm de conseguir reproduzir-se antes que a cultura complete seu ciclo e ocorra o preparo de solo, destruindo a planta daninha.

Os cultivos de hortaliças são exemplos de locais onde ocorrem plantas daninhas ruderais, visto que ocorre intenso preparo de solo, e as plantas cultivadas possuem ciclo curto. Em estudo de interferência de plantas daninhas na cultura da cenoura, Coelho et al. (2009) relataram que a convivência da cultura da cenoura com as plantas daninhas durante todo o ciclo da cultura reduziu a produtividade em 94%.

As plantas daninhas anuais e perenes possuem maior estratégia competitiva pelos recursos de crescimento. São plantas que, metabolicamente, investem mais em produção de biomassa do que em produção de dissemínulos, com sistema radicular e parte aérea maiores, para melhor absorção de água, nutrientes e interceptação luminosa, consequentemente, com maior crescimento e ocupação de espaço. Em condições de estresse, essas plantas reduzem a alocação de fotoassimilados para o crescimento vegetal e para a produção de sementes, utilizando a energia apenas para sua manutenção (COBB; READE, 2010).

A prática da monocultura ou mesmo da sucessão de culturas exerce uma pressão de seleção sobre as plantas daninhas. A partir disto, determinadas características são selecionadas em cada espécie, proporcionando vantagem competitiva das plantas daninhas sobre as plantas cultivadas. Para que a cultura tenha vantagem competitiva, é interessante que ela se desenvolva na área antes do surgimento da planta daninha, o que proporciona vantagem na ocupação do espaço para o desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea, absorvendo água e nutrientes e interceptando maior luminosidade.

3.3 Plasticidade genética e morfológica

Como mecanismo de sobrevivência, as plantas daninhas adaptam-se ao ambiente em que estão inseridas, podendo alterar morfologicamente seu porte, formato de folha, capacidade de rebrota, dentre outros. A alteração genética de uma população ocorre quando, em diversos ciclos da planta daninha, determinada característica ocorre e é herdada, ou quando é selecionada pelas ações antrópicas, como, por exemplo, a tolerância (melhoramento genético) ou resistência (pressão de seleção) de plantas daninhas a herbicidas.

Em ambientes agrícolas onde há modificação do meio, são desenvolvidos ajustes fisiológicos e morfológicos no indivíduo e na população, para a manutenção da sobrevivência. Essas características adaptativas conferem agressividade às plantas daninhas, garantindo sobrevivência e perpetuação no ambiente (PITELLI; PAVANI, 2005). Dessa forma, a capacidade de mudança e de adaptação das plantas daninhas garantem flexibilidade adaptativa às mudanças do meio com o passar do tempo (FERNANDEZ, 1979).

O sistema de colheita de cana crua é um exemplo de como a presença da palha sobre o solo propicia o desenvolvimento de determinadas espécies e impede o desenvolvimento de outras, selecionando a flora infestante. Ao aumentar a quantidade de palha sobre o solo, há uma modificação das espécies de plantas daninhas presentes na área, isto é, com menor quantidade de palha há maior predominância de espécies monocotiledôneas e, ao aumentar a quantidade de palha, há predominância das eudicotiledôneas (ARÉVALO, 1998; FERREIRA et al., 2010) (Tabela 3).

Tabela 3. Proporção de espécies monocotiledôneas e eudicotiledôneas de acordo com a quantidade de palha sobre o solo em áreas de cana-de-açúcar

Qtd de palha (t ha^{-1})	Espécies	Classificação
	C. echinatus (capim-carrapicho)	monocotiledônea
	Chloris polydactyla (capim-branco)	
	Cynodon dactylon (grama-seda)	
	C. rotundus (tiririca)	
	D. horizontalis (capim-colchão)	
< 5	*D. insularis* (capim-amargoso)	

	Digitaria sanguinalis (capim-colchão)	
	E. indica (capim-pé-de-galinha)	
	P. maximum (capim-colonião)	
	R. exaltata (capim-camalote)	
	U. decumbens (capim-braquiária)	
	U. plantaginea (capim-marmelada)	
5 – 15	*Ipomoea acuminata* (corda-de-viola)	eudicotiledônea
	Ipomoea purpurea (corda-de-viola)	
	M. cissoides (corda-de-viola-branca)	
	Sida cordifolia (guanxuma)	
	Sida glaziovii (guanxuma)	
	C. dactylon (grama-seda)	monocotiledônea
	C. rotundus (tiririca)	
	D. insularis (capim-amargoso)	
	R. exaltata (capim-camalote)	
> 15	*E. heterophylla* (amendoim-bravo ou leiteiro)	eudicotiledônea
	Pyrostegia venusta (flor-de-São-João)	

Fonte: Adaptado de Arévalo (1998).

Isso pode ser explicado, pois as plantas monocotiledôneas, em sua maioria, são fotoblásticas positivas, e as eudicodiledôneas, fotoblásticas negativas. Assim, com a predominância de um grupo de plantas, há aumento de dissemínulos daquelas espécies no banco de sementes, e com o passar do tempo, haverá predomínio de determinadas espécies na área.

3.4 Reprodução e disseminação

De acordo com o ambiente em que estão inseridas, as plantas daninhas desenvolvem mecanismos de sobrevivência, através da disseminação de sementes, propágulos e manutenção da espécie. O sucesso no estabelecimento da espécie com os ciclos de reprodução confere agressividade à planta daninha, de acordo com diversas características como

3.4.1 Grande produção de dissemínulos (sementes, rizomas, bulbos, estolões e tubérculos).

A elevada produção de sementes pelas plantas daninhas visa a maximizar as chances de perpetuação no ambiente. Porém, em espécies que produzem elevado número de sementes, a taxa de sucesso no estabelecimento da espécie é baixa, isto é, o número de sementes germinadas em relação ao número de sementes produzidas (CONCENÇO et al., 2014). Fleck et al. (2003), em estudo com *B. pilosa e S. rhombifolia*, na cultura da soja, relataram variação de 5,9 a 101,2 mil sementes m^{-2} de *B. pilosa* e de 1,4 a 28,2 mil sementes m^{-2} de *S. rhombifolia*, de acordo com a densidade de plantas. Outros autores, estudando plantas mais agressivas, como *A. palmeri*, relatam a produção de 250.000 sementes por planta (SELLERS et al., 2003) e de até 514.000 sementes quando há 8 plantas m^{-2} (MASSINGA et al., 2001).

3.4.2 Desuniformidade de germinação e longevidade.

A germinação escalonada no tempo em que ocorre com plantas daninhas, principalmente com sementes e tubérculos, está ligada aos processos de dormência, que é uma das estratégias de sobrevivência (SILVA et al., 2007). Isto garante diversos fluxos de germinação de plantas daninhas. A germinação irá ocorrer quando for quebrada a dormência, e os fatores biológicos para o desenvolvimento de uma nova planta forem favoráveis. A longevidade, aliada à dormência, permite a presença da semente no solo por diversos anos.

3.4.3 Capacidade de germinar e emergir em diferentes profundidades.

Em geral, sementes com maior quantidade de reservas possuem a capacidade de germinar em maiores profundidades, desde que os demais fatores necessários para a germinação (umidade, luminosidade, etc.) não sejam limitantes. Yamashita et al. (2005) relataram que sementes de *S. obtusifolia* germinaram na profundidade de 10 cm, e sementes de B. pilosa, a 5 cm. Com sementes de *Tridax procumbens* (erva-

-de-touro), Guimarães et al. (2002) relataram que a germinação abaixo de 1 cm de profundidade é baixa, sendo nula a 3 cm de profundidade; e para plantas de buva, a germinação é quase totalmente reduzida em profundidades de solo superiores a 1 cm.

3.4.4 Viabilidade do propágulo em condições adversas.

Algumas sementes de plantas daninhas mantêm a viabilidade e germinam mesmo após passar por condições adversas. Um exemplo são as sementes de plantas daninhas em áreas de arroz alagado ou em regiões com baixo índice pluviométrico. Silva et al. (2007) citam o exemplo de sementes de *Convolvulus arvensis* que se mantêm viáveis mesmo passando pelo trato digestivo de bois e porcos.

3.4.5 Dispersão através de diferentes meios.

Os dissemínulos podem espalhar-se por grandes distâncias através da água, do vento, pelo homem, através das máquinas, dos animais, no torrão de mudas, junto com os grãos cultivados, etc. Sementes de *B. pilosa*, *C. echinatus*, *A. hipidum e Desmodium tortuosum* podem ser transportadas de um local ao outro por aderir ao pelo dos animais, nas roupas, dentre outros. Plantas como *D. insularis*, *C. polydactyla*, *Conyza sp*. são de grande importância e facilmente dispersas pelo vento.

3.4.6 Crescimento inicial rápido.

Quando em ambiente favorável, diversas plantas daninhas têm rápido crescimento inicial. Áreas de produção de hortaliças são infestadas por plantas daninhas ruderais, com crescimento rápido devido ao bom preparo de solo, elevada fertilidade e disponibilidade de água. Outro exemplo, são as gramíneas *(Urochloa sp*., *Sorghum sp*.) que possuem rápido crescimento e grande produção de biomassa.

3.4.7 Diversidade dos mecanismos de reprodução.

A reprodução das plantas daninhas por diferentes tipos de dissemínulos é uma das ferramentas de adaptação às variações do ambiente e para a manutenção e perpetuação das espécies. A tiririca (*Cyperus sp*.) reproduz-se por tubérculos, rizomas, bulbos e sementes (HOLM et al., 1977). A a grama-seda *(C. dactylon*) reproduz-se por estolões e sementes.

4 CLASSIFICAÇÃO DAS PLANTAS DANINHAS

4.1 Classificação botânica

A classificação botânica auxilia na correta identificação das espécies e, portanto, assume um aspecto importante dentro da ciência das plantas daninhas. Nesse sentido, a identificação é a primeira etapa a ser considerada na elaboração de um programa de manejo de plantas daninhas. Baseadas nas características morfológicas, as plantas são agrupadas em classes, ordens, famílias, gêneros e espécies. Contudo, no campo, o mais importante é saber reconhecer os gêneros e as espécies de plantas daninhas, principalmente nos estádios iniciais de crescimento, momento em que as plantas daninhas são mais suscetíveis ao manejo. Notadamente, as plantas daninhas de maior importância na agricultura pertencem à classe das eudicotiledôneas (por exemplo, famílias Amaranthaceae e Asteraceae) e monocotiledôneas (por exemplo, famílias Poaceae e Cyperaceae). Como visto, é preciso conhecê-las, não apenas no aspecto botânico (morfologia e fisiologia), mas também no que se refere ao ciclo de vida e ao habitat em que elas se desenvolvem.

4.2 Ciclo de vida

Dentro de uma infestação natural, eventualmente podem ser identificadas plantas daninhas de ciclos anuais, bianuais e perenes. As espécies de ciclos anuais

dentro de um ano completam seu ciclo biológico, enquanto as espécies bianuais em até dois anos, e as perenes, em mais de dois anos (BLANCO, 2014). Das espécies anuais, algumas podem iniciar seu ciclo de vida no outono-inverno e terminá-lo no verão, classificadas anuais de inverno, enquanto outras espécies iniciam o ciclo de vida na primavera-verão e normalmente terminam no outono, ou pouco antes do inverno, consideradas anuais de verão (SILVA et al., 2007). Por outro lado, nas espécies bianuais, o primeiro ano é marcado pelo início do ciclo de vida e do crescimento vegetativo e, no segundo ano, pela floração, produção de sementes e morte das plantas (BRIGHENTI; OLIVEIRA, 2011). Finalmente, as espécies perenes vivem por mais de dois anos, reproduzindo-se por sementes ou propágulos vegetativos durante vários anos consecutivos, subdivididas em perenes herbáceas simples, herbáceas complexas, perenes lenhosas, perenes rizomatosas, perenes estoloníferas, perenes tuberosas e lenhosas (SILVA et al., 2007).

No Brasil, são poucas as espécies bianuais, e por isso maior atenção deve ser dada às espécies de ciclos anuais, que normalmente representam a grande maioria das sementes de plantas daninhas enterradas em solos agrícolas, seguidas das espécies de plantas daninhas perenes (BHOWMIK, 1997). Além disso, é importante ressaltar que algumas plantas daninhas podem comportar-se como anuais ou bianuais, em reposta às alterações no ambiente agrícola. Ainda, no caso das plantas daninhas de ciclos anuais, a infestação em áreas agrícolas não se limita apenas à época caracterizada pelas anuais de verão e/ou de inverno, podendo encontrá-las em outras épocas ou durante todo o ano.

4.3 Hábitat

As plantas daninhas também se diferenciam quanto à preferência do hábitat, e por isso o manejo torna-se um desafio nos mais diversos ambientes: terrestre, aquático e sobre outras plantas (hospedeiras). No ambiente edáfico, as plantas daninhas desenvolvem-se nas mais diferentes condições físicas e químicas dos solos, porém algumas espécies são favorecidas em situações específicas, como o nível de fertilidade do solo (SHIRATSUCHI et al., 2005).

De acordo com Silva et al. (2007) e Brighenti e Oliveira (2011), as plantas

daninhas terrestres que interferem negativamente em lavouras anuais e perenes, pastagens e florestas são conhecidas também por seu hábito de crescimento, destacando-se aquelas dos tipos (I) herbáceas, plantas tenras (geralmente sem lignificação) de baixo porte, prostrada ou ereta; (II) subarbustivas, arbustivas e arbóreas, plantas lenhosas de porte ereto e com ramificações; (IV) trepadeiras volúveis ou cirríferas, plantas que utilizam outras como suporte enrolando-se ou por meio de gavinhas; (V) hemiepífitas, iniciam seu desenvolvimento como trepadeiras e, posteriormente, suas raízes alcançam o solo; (VI) epífitas, crescem sobre outras plantas, afastadas do solo, mas não utilizam fotoassimilados da planta hospedeira.

As plantas daninhas aquáticas podem estar presentes nas bordas ou dentro dos corpos hídricos, ocasionando inúmeros inconvenientes ao uso múltiplo da água, além dos prejuízos ambientais e econômicos. Portanto, as plantas daninhas aquáticas proliferam em ecossistemas naturais, como lagos, rios e riachos, quanto dos artificiais, como reservatórios de hidrelétricas, represas e açudes para o abastecimento de água (ROCHA; MARTINS, 2011). Devido à grande diversidade das populações de plantas daninhas aquáticas, a identificação das espécies em corpos hídricos é considerada uma etapa crítica para a elaboração de planos de manejo, principalmente em reservatórios de hidrelétrica (MARTINS et al., 2003).

Deste modo, as espécies podem ser classificadas em distintos grupos como: (I) emersas, estas plantas são enraizadas e a maior parte do caule e folhas permanecem acima da superfície da água, preferem locais rasos ou ao longo das margens dos corpos hídricos; (II) emersas com folhas flutuantes, plantas enraizadas com folhas flutuantes conectadas por caules submersos; (III) submersas, as plantas possuem a maior parte das folhas e caule abaixo da superfície da água e, geralmente, as flores ficam acima desta superfície, e podem ser enraizadas ou livres; (IV) flutuantes, nestas plantas as raízes ficam livres na água e suas folhas e flores acima da superfície (TANAKA et al., 2002).

As plantas daninhas parasitas são distribuídas em todo o mundo e, geralmente estão associadas com parasitismo de plantas ornamentais, árvores e arbustos em florestas e diversas culturas agrícolas (PARKER, 2012). Por conseguinte, as plantas hospedeiras têm seus processos fisiológicos, reprodutivos e ecológicos afetados na presença do parasitismo, o que resulta no desequilíbrio entre água e nutrientes, redução da taxa de fotossíntese e respiração e, em situações extremas, levando-as

à morte (PRESS et al., 1999; AUKEMA, 2003).

Devido à ampla variação de morfologias, estratégias de vida e formas de crescimento, as plantas parasitas são classificadas como (I) hemiparasitas, que contêm clorofila; e holoparasitas, em que a clorofila está ausente; (II) parasitas obrigatórias, que precisam estar conectadas a um hospedeiro imediatamente após a germinação; e parasitas facultativas, que são aquelas que se associam à planta hospedeira após maturidade; e (III) parasitas de brotos ou raízes, que se ligam às plantas hospedeiras de acordo com a posição do haustório (raízes modificadas) (PRESS; PHOENIX, 2005; SHEN et al., 2006). No Brasil, as espécies mais conhecidas são *Cuscuta racemosa* (BRIGHENTI; OLIVEIRA, 2011) e algumas espécies de erva-de-passarinho (AZEVEDO et al., 2018).

Do ponto de vista agronômico, é recorrente a dificuldade de utilizar a informação da biologia das plantas daninhas na elaboração de estratégias de manejo nos diferentes sistemas agrícolas. Com base nos ciclos de vida, recomenda-se adotar o manejo de plantas daninhas de ciclos anuais antes da produção de sementes. No caso específico de plantas daninhas perenes, devido à habilidade de colonizar rapidamente vários ambientes agrícolas, deve-se priorizar o manejo integrado dessas espécies, bem como evitar o controle mecânico (aração e gradagem), pois pode contribuir para o aumento significativo da infestação por meio da multiplicação dos propágulos vegetativos.

Na Tabela 4, são apresentadas algumas plantas daninhas terrestres de importância no Brasil, classificadas botanicamente e quanto ao ciclo de vida.

Tabela 4. Exemplos de plantas daninhas terrestres de importância econômica para o Brasil.

Família	**Gênero**	**Espécie**	**Nome comum**	**Ciclo de vida**
Amaranthaceae	*Alternanthera*	*A. tenella*	apaga-fogo	A/P
	Amaranthus	*A. deflexus*	caruru-rasteiro	A
		A. hybridus	caruru-roxo	A
		A. retroflexus	caruru-gigante	A
		A. spinosus	caruru-de-espinho	A
		A. viridis	caruru-de-mancha	A
		A. palmeri	caruru-palmeri	A

Família	Gênero	Espécie	Nome comum	Ciclo de vida
Asteraceae	*Acanthospermum*	*A. australe*	carrapichinho	A
		A. hispidium	carrapicho-de-carneiro	A
	Ageratum	*A. conyzoides*	mestrasto	A
	Bidens	*B. pilosa*	picão-preto	A
		B. subalternans		A
	Conyza	*C. bonariensis*	buva	A
		C. canadensis		A
		C. sumatrensis		A
	Emilia	*E. fosbergii*	falsa-serralha	A
	Parthenium	*P. hysterophorus*	losna-branca	A
	Sonchus	*S. oleraceus*	serralha	A
	Tridax	*T. procumbens*	erva-de-touro	A
	Xanthium	*X. strumarium*	carrapichão	A
Brassicaceae	*Brassica*	*B. rapa*	mostarda	A
	Raphanus	*R. raphanistrum*	nabiça	A
		R. sativus	nabo	A
Commelinaceae	*Commelina*	*C. benghalensis*	trapoeraba	P
Convolvulaceae	*Ipomoea*	*I. hederifolia*	corda-de-viola	A
		I. nil		A
		I. purpurea		A
		I. quamoclit		A
		I. triloba		A
	Merremia	*M. cissoides*	corda-de-viola-branca	A
Cucurbitaceae	*Mormordica*	*M. charantia*	melão-de-São-Caetano	A
Cyperaceae	*Cyperus*	*C. difformis*	tiririca	A
		C. esculentus		P
		C. iria		A
		C. odoratus		A/P
		C. rotundus		P
Euphorbiaceae	*Chamaesyce*	*C. hirta*	erva-de-Santa-Luzia	A
	Euphorbia	*E. heterophylla*	Amendoim-bravo	A
	Ricinus	*R. communis*	mamona	P

Família	Gênero	Espécie	Nome comum	Ciclo de vida
Fabaceae	*Senna*	*S. obtusifolia*	fedegoso	P
		S. occidentalis		P
	Aeschynomene	*A. denticulata*	angiquinho	A
Fabaceae	*Aeschynomene*	*A. rudis*	angiquinho	A
Lamiaceae	*Leonotis*	*L. nepetifolia*	cordão-de-frade	A
Malvaceae	*Sida*	*S. cordifolia*	guanxuma	P
		S. glaziovii		P
		S. rhombifolia		A/P
		S. spinosa		P
Poaceae	*Cenchrus*	*C. echinatus*	capim-carrapicho	A
	Cynodon	*C. dactylon*	grama-seda	P
	Digitaria	*D. horizontalis*	capim-colchão	A
		D. insularis	capim-amargoso	P
		D. sanguinalis	capim-colchão	A
Poaceae	*Chloris*	*C. barbata*	capim-chloris	A/P
	Chloris	*C. elata*	capim-branco	P
	Echinochloa	*E. colona*	capim-arroz	A
		E. crus-galli	capim-arroz	A
	Echinochloa	*E. crus-pavonis*	capim-pé-de-galinha	A
		E. indica		A/P
Poaceae	*Lolium*	*L. multiflorum*	azevém	A/B
Portulacaceae	*Oryza*	*O. sativa var. nigrispina*	arroz-preto	A
	Oryza	*O. sativa*	*arroz-vermelho*	A
	Panicum	*P. maximum*	capim-colonião	P
	Pennisetum	*P. setosum*	capim-oferecido	P
	Rhynchelytrum	*R. repens*	capim-favorito	A/P
	Rottboellia	*R. cochinchinensis*	capim-camalote	A
	Sorghum	*S. arundinaceum*	falso-massambará	A/P
	Sorghum	*S. halepense*	capim-massambará	P
	Urochloa	*U. decumbens*	capim-braquiária	P
	Urochloa	*U. plantaginea*	capim-marmelada	A
	Portulaca	*P. oleraceae*	beldroega	A

Família	Gênero	Espécie	Nome comum	Ciclo de vida
Rubiaceae	*Richardia*	*R. brasiliensis*	poaia-branca	A
Solanaceae	*Spermacoce*	*S. latifolia*	erva-quente	A
	Spermacoce	*S. verticillata*	vassourinha-de-botão	P
	Nicandra	*N. physaloides*	joá-de-capote	A
Solanaceae	*Solanum*	*S. americanum*	maria-pretinha	A

A: anual; P: perene; B: bianual.

Fonte: Adaptado de Kissman e Groth (2007), Lorenzi (2008), Ward et al. (2013) e Lorenzi (2014).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As plantas daninhas estiveram, estão e estarão presentes no ambiente agrícola. Ressalta-se que as plantas daninhas não são indesejáveis em todos os momentos, mas muitas vezes irão causar prejuízos. Cabe a nós encontrarmos ferramentas que sejam eficazes em seu manejo, para isso é necessário estudá-las a fundo. O conhecimento sobre a germinação, reprodução e dispersão de sementes é fundamental para subsidiar as ferramentas necessárias para o manejo das mesmas.

REFERÊNCIAS

ADEGAS, F.S. et al. Impacto econômico da resistência de plantas daninhas a herbicidas no Brasil. **Circular Técnica 132** (Embrapa Soja), 11p. 2017.

AGRA, M.D.F. et al. Synopsis of the plants known as medicinal and poisonous in Northeast of Brazil. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v.17, p. 114-140, 2007.

ALBRECHT, A.J.P. et al. Interferência de densidades populacionais de buva na produtividade de soja. In: Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas, 2018, **Anais**... Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

ARÉVALO, R.A. Manejo de plantas daninhas em áreas de colheita de cana crua. **STAB**, v. 3, p. 26-28, 1998.

AUKEMA J.E. Vectors, viscin, and viscaceae: mistletoes as parasites, mutualists, and resources. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v.1, p. 212-219, 2003.

AZEVEDO, J.M.L. et al. Morphometry and germination of *Passovia pyrifolia*, *Struthanthus marginatus and Phoradendron mucronatum* diaspores. **Planta Daninha**,v. 36, 12 p. 2018.

BARBOSA, R.R. et al. Plantas tóxicas de interesse pecuário: importância e formas de estudo. **Acta Veterinaria Brasica**, v.1, p.1-7, 2007.

BELLE C. et al. Plantas daninhas como hospedeiras alternativas para *Meloidogyne incognita*. **Nematropica**, v. 47, p. 26-33, 2017.

BHOWMIK, P.C. Weed biology: importance to weed management. **Weed Science**, v.45, p. 349-356, 1997.

BLANCO F.M.G. Classificação e mecanismos de sobrevivência das plantas daninhas. In: MONQUERO, P.A. (Ed.). **Aspectos da biologia e manejo das plantas daninhas**. São Carlos: Editora Rima – SBCPD, 2014. p.33-60.

BRIGHENTI, A.M.; Oliveira M.F. Biologia de plantas daninhas. In: OLIVEIRA JÚNIOR, R.S. et al. (Ed.). **Biologia e manejo de plantas daninhas**, Curitiba: Omnipax, 2011. p.1-36.

CARVALHO, F.K.D.L. et al. Intoxicação por *Ipomoea asarifolia* em bovinos e ovinos no Rio Grande do Norte. **Pesquisa Veterinária Brasileira**, v. 34, p. 1.073-1.076, 2014.

CATTANI, S.M.M. Levantamento de espécies ruderais em uma área de pastagem abandonada na Represa de Itupararanga, Votorantim-SP. **Revista Eletrônica de Biologia**, v. 2, p. 38-55, 2009.

CAVALCANTE, J.T. et al. Períodos de interferência de plantas daninhas em genótipos de batata-doce. **Cult Agron**, v. 26, p. 640-656, 2017.

COBB, A.H.; READE, J.P. **Herbicides and plant physiology**. Cambridge:John Wiley & Sons, 2010.

COELHO, M. et al. Interferência de plantas daninhas na cultura da cenoura (*Daucus carota*). **Planta Daninha**, v.27, p. 913-920, 2009.

CONCENÇO, G. et al. Ciência das plantas daninhas: histórico, biologia, ecologia e fisiologia. In: MONQUERO, P.A. (Ed.). **Aspectos da biologia e manejo das plantas daninhas**. São Carlos: Editora Rima – SBCPD, 2014. p.1-29.

CORDEIRO, J.M.P.; FÉLIX, L.P. Conhecimento botânico medicinal sobre espécies vegetais nativas da caatinga e plantas espontâneas no agreste da Paraíba, Brasil. **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, v. 16, p. 685-692, 2014.

CORRÊA, M.J.P. et al. Períodos de interferência de plantas daninhas na cultura do feijão caupi. **Revista de Ciências Agroambientais**, v. 13, p. 50-56, 2016.

CURY, J.P. et al. Dry matter production and distribution of bean cultivars under weed competition. **Planta Daninha**, v. 29, p. 149-158, 2011.

D'Oliveira, P.S. et. al. Plantas tóxicas em pastagens: cafezinho *(Palicourea marcgravii* St. Hill, Família Rubiaceae). **Comunicado Técnico** 58 (Embrapa Gado de Leite), 8p. 2018.

ESPÍNOLA, L.A.; FERREIRA, J.JR. Espécies invasoras: conceitos, modelos e atributos. **Interciencia**, v. 32, p. 580-585, 2007.

FERNANDEZ, O. Las malezas y su evolución. **Ciencia y Investigacion,** v. 35, p. 49-60, 1979.

FERREIRA, E.A. et al. Manejo de plantas daninhas em cana-crua. **Planta Daninha**, v. 28, p. 915-925, 2010.

FLECK, N.G. et al. Produção de sementes por picão-preto e guanxuma em função de densidades das plantas daninhas e da época de semeadura da soja. **Planta Daninha**, v. 21, p. 191-202, 2003.

GAZZIEIRO, D.L.P. et al. Efeitos da convivência do capim-amargoso na produtividade da soja. In: Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas, 2012, **Anais**... Campo Grande-MS:SBCPD, 2012. 6p.

GUIMARÃES, S.C. et al. Emergência de *Tridax procumbens* em função da profundidade de semeadura, do conteúdo de argila no substrato e da incidência de luz na semente. **Planta Daninha**, v. 20, p. 413-419, 2002.

HEAP I. **The international survey of herbicide resistants weeds**. 2019. Online. Disponível em: www.weedscience.org. Acesso em: 15 maio 2019.

HOLM, L.G. et al. **The world's worst weeds**. Honolulu:University Press of Hawaii, 1977.

ILHA, M.R. et al. Intoxicação espontânea por *Senecio brasiliensis* (Asteraceae) em ovinos no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Veterinária Brasileira**, v. 21, p. 123-138, 2001.

KISSMANN, K.G.; GROTH, D. **Plantas infestantes e nocivas**. 3ed. São Paulo:Basf, 2007.

KOZLOWSKI, L.A. et al. Épocas e extensões do período de convivência das plantas daninhas interferindo na produtividade da cultura do milho (*Zea mays*). **Planta Daninha**, v. 27, p. 481-490, 2009.

KUVA, M.A. et al. Períodos de interferência das plantas daninhas na cultura da cana-de-açúcar: I - Tiririca. **Planta Daninha**, v. 18, p. 241-251, 2000.

LEITE, C.D. et al. **Plantas indicadoras – parte 1**. 2016. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA. Online. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/organicos/fichas-agroecologicas/arquivos-fertilidade-do-solo/34-plantas-indicadoras-parte-1.pdf/view>. Acesso em: 19 jun 2019.

LEITE, C.D. et al. **Plantas indicadoras – parte 2**. 2016. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA. Online. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/organicos/fichas-agroecologicas/arquivos-fertilidade-do-solo/35-plantas-indicadoras-parte-2.pdf/view>. Acesso em: 19 de junho de 2019.

LOPES, C.G.R. et al. Levantamento da flora apícola em área de cerrado no município de Floriano, Estado do Piauí, Brasil. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 14, p. 102-110, 2016.

LORENZI, H. **Manual de identificação e controle de plantas daninhas:** plantio direto e convencional. 7ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2014.

LORENZI, H. **Plantas Daninhas do Brasil:** terrestres, aquáticas, parasitas e tóxicas. 4ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2008.

MANABE, P.M.S. et al. Efeito da competição de plantas daninhas na cultura do feijoeiro. **Bioscience Journal**, v. 31, p. 333-343, 2015.

MARTINS, D. et al. Caracterização química das plantas aquáticas coletadas no reservatório de Salto Grande (Americana-SP). **Planta Daninha**, v.21, p. 21-26, 2003.

MARTINS, D. et al. Chemical aquatic weed control in resevoir. **Planta Daninha**, v. 17, p. 289-296, 1999.

MARTINS, D. et al. Levantamento da infestação de plantas aquáticas em Porto Primavera antes do enchimento final do reservatório. **Planta Daninha**, v. 27, p. 879-886, 2009.

MASSINGA, R.A. et al. Interference of palmer amaranth in corn. **Weed Science**, v. 49, p. 202-208, 2001.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. **Instrução normativa nº 46, de 24 de setembro de 2013**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, set. 2013. ed. 186, seção: 1, p. 37 (Publicado em: 25/09/2013). Online. 2013. Disponível em: <http://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/31061211/ do1-2013-09-25-instrucao-normativa-n-46-de-24-de-setembro-de-2013-31061207>. Acesso em 21 maio 2019.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. **Portaria nº 112, de 8 de outubro de 2018**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, out. 2019, ed.198, seção: 1, p. 4 (Publicado em: 15/10/2018). Online. 2019. Disponível em: <http://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/45174395/do1-2018-10-15-portaria-n-112-de-8-de-outubro-de-2018-45174182>. Acesso em: 21 maio 2019.

OERKE, E.C. Crop losses to pests. **The Journal of Agricultural Science**, v. 144, p. 31-43, 2006.

OLIVEIRA, A.R.; FREITAS, S.P. Phyto-sociological survey of weed in sugarcane crop areas. **Planta Daninha**, v. 26, p. 33-46, 2008.

OLIVEIRA, R.A.G.; RANDO, J.S.S. Diversidade de insetos em plantas hospedeiras próximas às áreas de cultivo de milho e algodão. **Journal of Neotropical Agriculture**, v. 4, p. 35-40, 2017.

PARKER, C. Parasitic weeds: A world challenge. **Weed Science**, v. 60, p. 269-276, 2012.

PITELLI, R.A. Competição e controle das plantas daninhas em áreas agrícolas. **Série Técnica IPEF**. v. 4, p. 1-24, 1987.

PITELLI, R.A. O termo planta-daninha. **Planta Daninha**, v. 33, p. 622-623, 2015.

PITELLI, R.A.; PAVANI, M.D.C. Feralidade vegetal e transgeníese. **Biotecnologia ciência & desenvolvimento**, v. 34, p. 100-105, 2005.

POLESI, R.G. et al. Agrobiodiversidade e segurança alimentar no Vale do Taquari RS: plantas alimentícias não convencionais e frutas nativas. **Revista Científica Rural**, v. 19, p. 118-135, 2017.

POLETTO, R.S. et al. Estudo sobre a origem, uso e distribuição das espécies invasoras e famílias botânicas encontradas nas praças de Cornélio Procópio - PR, Brasil. **Revista ESPACIOS**, v. 37, p. 12, 2016.

PRESS, M.C. et al. Parasitic plants: physiological e ecological interactions whit their hosts. In: PRESS, M.C. et al. (Ed.). **Physiological plant ecology**. Oxford: Blackwell Scientific, 1999. p.175-97.

PRESS, M.C., Phoenix, G. K. Impacts of parasitic plants on natural communities. **New Phytologist**, v. 166, p. 737-751, 2005.

ROCHA, D.C.; MARTINS, D. Levantamento de plantas daninhas aquáticas no reservatório de alagados, Ponta Grossa - PR. **Planta Daninha**, v. 29, p. 237-246, 2011.

SELLERS, B.A. et al. Comparative growth of six *Amaranthus* species in Missouri. **Weed Science**, v. 51, p. 329-33, 2003.

SHAUKAT, S. et al. Allelopathic responses of *Conyza canadensis* (L.) Cronquist: A cosmopolitan weed. **Asian Journal of Plant Science**, v. 2, p. 1.034-1.039, 2003.

SHEN, H. et al. Progress in parasitic plant biology: host selection and nutrient transfer. **Plant Biology**, v. 8, p. 175-185, 2006.

SHIRATSUCHI, L.S. et al. Correlação da distribuição espacial do banco de sementes

de plantas daninhas com a fertilidade do solo. **Planta Daninha**, v. 23, p. 429-436, 2005.

SILVA, A.A. et al. Biologia de plantas daninhas. In: SILVA, A.A. et al. **Proteção de plantas: manejo de plantas daninhas**. Viçosa: Editora Cead, 2010. p. 4-15.

SILVA, A.A. et al. Biologia de plantas daninhas. In: SILVA, A.A.; SILVA, J.F. (Ed.). **Tópicos em manejo de plantas daninhas**. Viçosa: UFV, 2007. p. 17-61.

SILVA, A.A.P. et al. Períodos de interferência entre plantas daninhas e a cultura da soja RR® na Região Centro Ocidental Paranaense. **Planta Daninha,** v. 33, p. 707-716, 2015.

SOARES FILHO, A.O. et al. Plantas ruderais no Planalto Conquistense, Bahia e sua importância. **Natureza on line**, v. 14, p. 27-43, 2016.

SOCIEDADE BRASILEIRA DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS – SBCPD. **Histórico SBCPD**. 2019. Online. Disponível em:< http://sbcpd.org/historico/>. Acesso em: 15 maio 2019.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE HERBICIDAS E ERVAS DANINHAS – SBHED. Sociedade Brasileira de Herbicidas e Ervas Daninhas. **Revista Engenheria Agrícola**, v. 38, p. 166, 1963.

SOUZA FILHO, A.P.S. et al. Efeitos de extratos aquosos de assa-peixe sobre a germinação de três espécies de braquiária. **Planta Daninha**, v. 14, p. 93-101, 1996.

SOUZA, I.R.P. et al. Potyvirus causando mosaico em plantas daninhas nas culturas do milho e do sorgo. In: Congresso Nacional de Milho e Sorgo, 2016, **Anais**... Bento Gonçalves, RS: Embrapa Milho e Sorgo , 2016, 4p.

TANAKA, R.H. et al. Ocorrência de plantas aquáticas nos reservatórios da companhia energética de São Paulo. **Planta Daninha**, v. 20, p. 101-111, 2002.

TOKARNIA, C.H. et al. Intoxicação experimental por *Asclepias curassavica* (Asclepiadaceae) em bovinos. Dados complementares1. **Pesquisa Veterináaria Brasileira**, v. 21, p. 1-4, 2001.

WARD, S.M. et al. Palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*): A review. **Weed Technology**, v. 27, p. 12-27, 2013.

YAMASHITA, O.M.; Guimarães S.C. Resistência de plantas daninhas ao herbicida glyphosate. **Varia Scientia Agrárias**, v. 3, p. 189-215, 2013

CAPÍTULO 2

ECOLOGIA DE POPULAÇÕES E COMUNIDADES DE PLANTAS DANINHAS

Rúbia Luciane Dominschek Lima de Lai[1]
Samia Rayara de Sousa Ribeiro[2]
Arthur Arrobas Martins Barroso[3]
Maurício Zanovello Schuster[1]

[1]Doutor (a), Universidade Federal do Paraná – UFPR, [2]Doutoranda, Universidade Federal do Paraná – UFPR, [3]Doutor, Professor Universidade Federal do Paraná – UFPR.

1 INTRODUÇÃO

Plantas daninhas são recorrentes nos sistemas de produção agropecuários. Esta presença deve-se principalmente às estratégias de perpetuação das espécies, ou seja, a aspectos ligados ao desenvolvimento, reprodução e dispersão. A maior plasticidade fenotípica das plantas daninhas, somada a um nicho reprodutivo mais amplo e generalista, em média mais longo do que as culturas, são as principais características que permitem melhor adaptação ecológica aos distúrbios promovidos pela agricultura. Compreender tais características é essencial para se desenvolver estratégias efetivas de manejo.

2 REPRODUÇÃO

A reprodução das plantas daninhas, assim como de qualquer planta, pode ser via produção de sementes (reprodução sexuada) e/ou por estrutura vegetativa (reprodução assexuada).

2.1 Produção de sementes

A produção de sementes é considerada a principal unidade de propagação das plantas daninhas, especialmente para as plantas anuais (ZIMDAHL, 2007). A sobrevivência de muitas das angiospermas depende da produção de um número suficiente de sementes viáveis. Uma das características mais marcantes das plantas daninhas é justamente a grande produção de sementes: dezenas, centenas ou milhares de sementes por indivíduo. O número varia em função da espécie e das condições ambientais.

A reprodução seminífera depende da polinização e fecundação do óvulo. Um aspecto interessante sobre a polinização é que as plantas daninhas frequentemente são autocompatíveis (autógamas), no entanto a autopolinização pode não ser obrigatória. Um exemplo de planta daninhas autógama é o capim-pé-de-galinha (*Eleusine indica*). Trata-se de uma característica que confere alto potencial de infes-

tação, pois apenas uma planta pode autofecundar-se e gerar vários descendentes.

Quando as plantas daninhas apresentam polinização cruzada (alógamas), geralmente não requerem agentes polinizadores específicos, ou a polinização ocorre por ação do vento, tornando mais rápida e fácil a colonização de novas áreas. Entretanto, o sucesso de novas colonizações pelas plantas daninhas depende de condições edafoclimáticas iguais ou melhores às daquelas quais estão adaptadas, ausência ou menor competição com outras plantas e ausência ou poucos inimigos naturais. Além disso, são essenciais também para a adaptabilidade da planta a capacidade reprodutiva, o número inicial de indivíduos, a plasticidade fenotípica e o potencial de preservação da linha genética no tempo (CARVALHO, 2013).

Muitas espécies de plantas daninhas têm a habilidade de produzir sementes quando jovens. Por exemplo, a língua-de-vaca pode florescer e produzir sementes com um palmo de altura, aproximadamente 20 cm (ZIMDAHL, 2007). Podem apresentar um curto tempo entre a floração e a maturação das sementes, aumentando as chances de sucesso na produção de sementes pela redução na duração do estágio reprodutivo.

Ainda, a produção de sementes pelas plantas daninhas ocorre em ampla faixa de condições edafoclimáticas. Esta plasticidade fenotípica, capacidade de adaptar-se ao ambiente e gerar frutos/sementes, conferem-lhes vantagem competitiva frente às culturas agrícolas, e propicia que se perpetuem com facilidade.

2.2 Estruturas vegetativas

Muitas plantas daninhas reproduzem-se de forma assexuada, sendo os indivíduos originados clones do progenitor, ou seja, apresentam características genéticas idênticas à planta-mãe. Não ocorre recombinação genética neste tipo de reprodução. A multiplicação vegetativa pode ocorrer pela germinação de gemas presentes em raízes, caules e folhas ou pelo enraizamento de estruturas de propagação, chamados propágulos, como bulbos, tubérculos, rizomas e estolões (ZUFFELLATO-RIBAS; RODRIGUES, 2001; FERRARI et al., 2004; HARTMANN et al., 2011; CARVALHO, 2013).

Bulbos são estruturas subterrâneas que servem tanto de reserva (nutricio-

nal e energética) quanto de reprodução vegetativa. São formadas por parte do caule e folhas modificadas, onde se desenvolvem gemas vegetativas que originam novas plantas com o mesmo material genético da planta de origem (LEWIS, 1996; CARVALHO, 2013). Trevo-azedo (*Oxalis spp*.) e alecrim-da-prata (*Bulbostylis capillaris* (L.) C. B. Clarke) são plantas daninhas que se reproduzem por bulbos.

Rizoma é um tipo de caule subterrâneo longo, que produz raízes adventícias e parte aérea. Possui função de reserva e de reprodução vegetativa, podendo produzir raízes e parte aérea. De aspecto de raiz bem grossa e rudimentar, os rizomas apresentam grande potencial para colonização e reprodução. Exemplos de plantas daninhas que apresentam rizomas: capim-amargoso (*Digitaria insularis*), tiririca (*Cyperus spp*.), losna-brava (*Artemisia verlotorum*) e grama-seda (*Cynodon dactylon*) (MAIA et al., 1995; CARVALHO, 2013).

O tubérculo é um caule arredondado, resultante da elongação dos rizomas, que se desenvolve abaixo do solo e tem função de reprodução vegetativa e reserva energética, pois muitas vezes concentra amido em sua estrutura (LEONEL; CEREDA, 2002). A formação dos tubérculos ocorre pelo excesso de carboidratos produzidos durante o processo fotossintético. Em algumas plantas, os tubérculos têm gemas germinativas espalhadas por toda sua superfície, na parte superior ou localizadas numa determinada extremidade (LEWIS, 1996; CARVALHO, 2013). Plantas daninhas que apresentam tubérculos são, por exemplo, a tiririca (*Cyperus spp*.), falsa-tiririca (*Hypoxis decumbens*) e aguapé (*Sagittaria guyanensis Kunth*).

Estolão, também conhecido como estolho em algumas regiões, é um tipo de caule longo com função reprodutiva, que se desenvolve formando raízes adventícias e parte aérea na região dos nós. Apresenta aspecto de um perfilho, às vezes sem folhas. Algumas plantas daninhas que apresentam estolões são: grama-seda (*Cynodon dactylon*), grama-boiadeira (*Luziola peruviana*) e capim-de-rhodes (*Chloris gayana*) (CARVALHO, 2013).

O controle mecânico ou manual de plantas daninhas que possuem estruturas vegetativas como forma de propagação, como a tiririca, o capim-massambará e a grama-seda, por exemplo, deve ser feito de forma cuidadosa, pois o corte destas estruturas pode provocar aumento no número destas, pela fragmentação dos propágulos, uma vez que cada fragmento poderá dar origem a uma nova planta (BRIGHENTI; OLIVEIRA, 2011).

Plantas daninhas que possuem reprodução tipo sexuada e assexuada são consideradas de difícil controle e alto potencial infestante. Dentre elas, destacam-se: tiririca (*Cyperus spp*.), capim-amargoso (*Digitaria insularis*), sagitária (*Sagittaria spp*.), trapoeraba (*Commelina spp*.), capim-de-rodhes (*Chloris gayana*), capim-dos-pampas (*Cortaderia selloana*), grama-seda *(Cynodon dactylon*), entre outras (CARVALHO, 2013). Na Figura 1 é possível observar algumas das estruturas vegetativas como estolão, rizoma, bulbo e tubérculo.

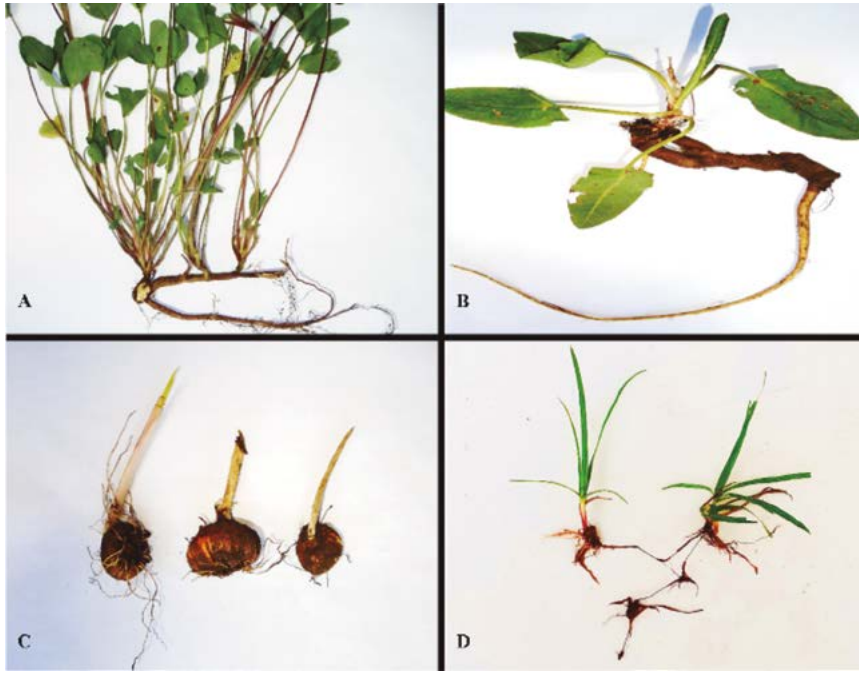


Figura 1. Estrutura vegetativa de: A) *Oxalis conrniculata* (estolão); B) *Rumex obtusifolia* (rizoma); C) *Oxalis conrniculata* (bulbos), e D) *Cyperus rotundus* (tubérculos).

3 DISPERSÃO

A dispersão trata-se da locomoção/transporte de sementes de plantas daninhas, sendo a disseminação o espalhamento tanto de sementes como de es-

truturas vegetativas. A facilidade de dispersão das sementes é uma característica importante das plantas daninhas, que faz com que sejam capazes de colonizar locais distantes da planta geradora (planta-mãe). Brighenti e Oliveira (2011) comentam que os problemas com as plantas daninhas seriam menos complicados se apenas a gravidade determinasse o destino das sementes.

Em algumas espécies, a propagação é realizada por meios próprios à planta-mãe (autocoria), em que os frutos caem no solo ou abrem-se na própria planta produtora, liberando suas sementes. É o caso de espécies com sementes grandes, como as gramíneas capim-arroz (*Echinochloa spp*.) e arroz-vermelho (*Oryza sativa*), ambas importantes invasoras em lavouras de arroz irrigado. Entre as dicotiledôneas, citam-se a mamona (*Ricinus communis*), o quebra-pedra (*Phyllanthus niruri)* e o leiteiro (*Euphorbia heterophylla*). Esta última espécie é um dos poucos casos de plantas daninhas que apresentam propulsão mecânica das sementes (deiscência explosiva). Ao fruto se abrir, pode lançar suas sementes de 2 a 5 metros de distância da planta-mãe (LORENZI, 2008).

Para a maior parte das plantas daninhas, a dispersão das sementes conta com auxílio de agentes externos (alocoria), como o vento (anemocoria), a água (hidrocoria), os animais (zoocoria) e o próprio homem (antropocoria). As sementes podem apresentar estruturas especiais que lhe favorecem este processo de dispersão para que sejam capazes de flutuar (vento ou água) ou então para terem habilidade de se agarrar/prender-se a algo.

O vento é um importante agente de dispersão. Grande parte das sementes de plantas daninhas são pequenas e leves. Mesmo desprovidas de estruturas específicas, têm sua disseminação aumentada pela ação do vento, propiciando a distribuição a longas distancias. Algumas sementes apresentam modificações estruturais aladas que permitem o transporte pelo vento, como plumas e hélices. É o caso de espécies da família *Asteraceae*, como falsa-serralha (*Emilia sonchifolia*), serralha (*Sonchus oleraceus*), buvas (*Conyza spp*.) e dente-de-leão (T*araxacum officinale*). Recentemente, Cummins et al. (2018) identificaram que o mecanismo de voo das sementes de dente-de-leão é promovido pela formação de um anel de vórtice ao redor delas. Isto permite que as sementes possam ser transportadas a distâncias maiores do que 100 metros (NATURE, 2019). A hipótese dos pesquisadores é de que isso só é possível devido à geometria circular e à porosidade do papus (cálice modificado).

Um exemplo importante de gramínea dispersada pelo vento é o capim-amargoso (*Digitaria insularis*).

A dispersão pela água ocorre por meio de água de chuvas, córregos, rios e por inundação. Zimdahl (2007) enfatiza que a água de reservatórios e canais de irrigação no oeste dos Estados Unidos foi uma importante fonte de dispersão de plantas daninhas. As sementes podem ser transportadas por boiarem/flutuarem na superfície da água, como as de caruru (*Amaranthus retroflexus*), mas, também podem ser transportadas estando submersas, pois podem permanecer viáveis por um longo período nesta condição. É comum no Brasil o transporte de sementes por canais de vinhaça na cana-de-açúcar.

Quando os animais são os agentes de dispersão, o transporte das sementes pode ser mecânico, quando a semente é carregada externamente ao corpo do animal (epizoocoria). Neste caso, existem estruturas modificadas que facilitam a aderência da semente, como espinhos, "ganchos" e até mesmo resina. Alguns exemplos são os aquênios (frutos secos) do carrapichão (*Xanthium strumarium*), do carrapicho-de-carneiro (*Acanthospermum hispidum*) e do picão-preto (*Bidens pilosa*). Entre as gramíneas, o capim-carrapicho (*Cenchrus echinatus*) é um exemplo de fruto com forma espinhosa. Há também o pega-pega ou carrapicho-beiço-de-boi (*Desmodium incanum*), uma leguminosa cujos frutos apresentam superfície pilosa e pegajosa.

No caso de frutos carnosos e plantas usadas como pastejo, o transporte pode ser via interna, pela ingestão e posterior defecação das sementes pelos animais (endozoocoria). Algumas sementes são capazes de sobreviver ao processo de ruminação. Um exemplo é a dispersão de sementes da grama-batatais (*Paspalum notatum*), quando suas sementes são ingeridas pelos bovinos.

O homem pode ser considerado o principal agende disseminador de plantas daninhas (antropocoria). É sem dúvida o agente capaz de disseminar sementes e estruturas de reprodução vegetativa a maiores distâncias. Uma das formas mais importantes de disseminação de plantas daninhas pelo homem é através de sementes de culturas. Este processo remonta aos tempos coloniais, quando chegaram ao nosso País as primeiras sementes agrícolas. Um exemplo mais recente é a disseminação da espécie cipó-de-veado (*Polygonum convolvulus*) na região sul do Paraná através de sementes de trigo contaminadas, procedentes do Rio Grande do Sul (LORENZI, 2008).

O capim-arroz (*Echinochloa spp.*) e a arroz-vermelho ou arroz-daninho (*Oryza sativa*) foram, e em alguns casos ainda são, disseminadas por estarem misturadas a sementes de arroz cultivado. Devido ao tamanho das sementes, estas espécies são colhidas juntamente com a cultura. Não é por acaso que estão entre as principais espécies infestantes em lavouras de arroz irrigado. Este exemplo ressalta a importância de dois aspectos de manejo preventivo de plantas daninhas: a utilização de sementes certificadas e a limpeza dos equipamentos, como as colhedoras.

Algumas espécies que hoje são daninhas foram introduzidas acidentalmente ou para fins forrageiros, como as gramíneas de origem africana: capim-brachiária (Urochloa decumbens), capim-marmelada (*Urochloa plantaginea*) e o capim-annoni (*Eragrostis plana*). Cabe ressaltar que as braquiárias ainda são utilizadas como plantas forrageiras, mas são recorrentemente invasoras em cultivos agrícolas. Já o capim-annoni não é mais utilizado como forragem devido a seu baixo valor nutricional. No entanto, é uma das espécies invasoras mais preocupantes em áreas de pastagens no Sul do Brasil, sendo de difícil controle. No final da década de 1950, foi multiplicada e vendida como uma forrageira milagrosa, e agora ocupa cerca de 20% das pastagens nativas (MEDEIROS et al., 2007).

Até o momento, foi discutido a respeito da dispersão das sementes de plantas daninhas no espaço. Contudo, a dormência é considerada uma forma de dispersão das plantas daninhas no tempo. A dormência é caracterizada quando as sementes de determinada planta não germinam, embora sejam fornecidas todas as condições ambientais favoráveis. Trata-se de mecanismos físicos e fisiológicos que impedem o processo de germinação. Acredita-se que a dormência evoluiu como, um mecanismo de sobrevivência da espécie a determinadas condições climáticas, como por exemplo, ao inverno em regiões temperadas ou a secas e temperaturas elevadas em regiões tropicais (BRACCINI, 2011). Portanto, esta característica permite que as sementes escapem de estresses ambientais e germinem quando as condições são mais favoráveis para sua sobrevivência.

As causas da dormência são provenientes de dois mecanismos básicos: o primeiro relacionado a eventos internos das sementes (embrião), e o segundo, às características externas, como tegumento, endosperma ou barreiras impostas pelo fruto. As sementes de plantas daninhas passam por ciclos anuais de maior ou menor dormência. Essas mudanças são atribuídas à variação de temperatura, à luz, às ca-

racterísticas do solo, à precipitação pluviométrica, às práticas culturais e à profundidade das sementes no solo (VIVIAN et al., 2008).

4 BANCO DE SEMENTES DE PLANTAS DANINHAS

Em solos agrícolas, o banco de sementes representa o montante de sementes e de propágulos vegetativos de espécies de plantas daninhas distribuídas ao longo do perfil do solo, sendo, portanto, fonte primária da infestação de plantas daninhas.

De maneira didática, pode-se caracterizar o banco de sementes em duas categorias: transitório e persistente. A porção que germina assim que as condições forem favoráveis dentro do período de um ano, é considerada como o banco de sementes transitório ou prontamente germinável. Já o persistente é constituído por dissemínulos (principalmente sementes) que permanecem viáveis no solo por um período superior a um ano.

O tamanho, a densidade (n° de indivíduos/área) e a composição botânica do banco de sementes são variáveis de acordo com o histórico de uso da área e das práticas de manejo adotadas. De maneira geral, a quantidade de sementes de plantas daninhas no solo é abundante, na casa de milhares de sementes por metro quadrado, o que resulta em milhões de sementes por hectare. Quanto à distribuição no perfil do solo, a maior parte das sementes concentra-se na camada mais superficial do solo.

Carmona (1995) constatou a variabilidade do tamanho do banco de sementes em função de diferentes agroecossistemas (Tabela 1).

Tabela 1. Estimativas do tamanho médio do banco de sementes presentes nos 10 primeiros centímetros de profundidade do solo em diferentes agroecossistemas, 1992, Brasília – DF.

Agroecossistema	Média de sementes viáveis / m^2 *
Cultivo de grãos rotação (milho-milho-feijão)	6.768
Várzea	22.313
Pomar	3.595
Pastagem	529

*Método de avaliação do banco de sementes sem lavagem prévia das amostras de solo.
Fonte: Adaptado de Carmona (1995).

A tendência é que os sistemas de produção que sofrem menos distúrbios, como as pastagens, apresentem menor banco de sementes de plantas daninhas. Por outro lado, áreas de várzea cultivadas costumam ter um banco de sementes mais numeroso em função de haver maior disponibilidade de área aliada a constantes perturbações no solo. Trabalhos mais recentes observaram tamanhos similares do banco de sementes aos encontrados por Carmona (1995). Em uma área tradicional produtora de soja no Estado do Rio Grande do Sul, Schuster et al. (2016) observaram valores entre 500 e 3.700 sementes de plantas daninhas por metro quadrado. Já em terras baixas (várzea), no Rio Grande do Sul, em uma área tradicional de cultivo de arroz irrigado, o tamanho do banco de sementes chega a ser 10 vezes maior, com densidades variando de 11 a 39 mil sementes / m^2 na camada mais superficial do solo (DENARDIN et al., 2018).

O banco de sementes no solo é regulado por processos de adição / entrada (novas infestações e/ou fontes de contaminação) e diminuição / saída das sementes (germinação, predação das sementes por organismos do solo, deterioração e senescência das sementes), sendo que complexas relações envolvem esses processos (Figura 2). O manejo do agroecossistema é uma importante engrenagem no funcionamento destes processos. Por isso o planejamento de manejo integrado de plantas daninhas deve considerar estratégias que diminuam a adição de sementes via novas infestações, bem como tomar medidas que reduzam o banco de sementes ao longo do tempo.

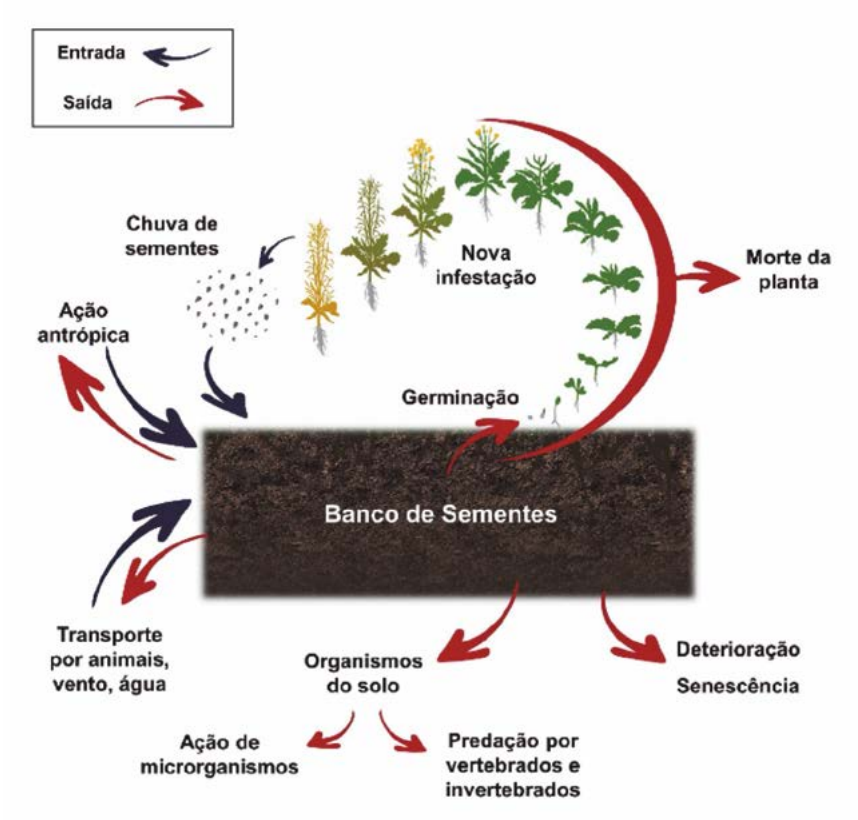


Figura 2. Dinâmica do banco de sementes de plantas daninhas no solo.

Schweizer e Zimdahl (1984) demonstraram que é possível diminuir o banco de sementes do solo, especialmente com a rotação de culturas e de herbicidas. No entanto, se o manejo das plantas daninhas é negligenciado em apenas um cultivo (safra), o banco de sementes pode aumentar rapidamente, sendo "reabastecido" com a nova infestação.

O manejo do solo influencia significativamente na dinâmica do banco de sementes. O revolvimento estimula a germinação das sementes. Partindo desse pressuposto, uma forma de diminuir o banco de sementes seria via preparo repetitivo do solo, a fim de estimular germinações sequenciais e de destruir as plântulas

recém-emergidas. No entanto, já está bem estabelecido o impacto negativo do revolvimento sobre os atributos do solo.

Zimdahl (2007) comenta como o problema com plantas daninhas foi agravado com o processo de preparo do solo. O preparo do solo promove a inversão de camadas de solo, acarretando na incorporação das sementes no perfil do solo. Este efeito pode ser observado no estudo de Denardin et al. (2018), que avaliaram o banco de sementes em área de várzea, em diferentes sistemas de produção e de preparo do solo (Figura 3).

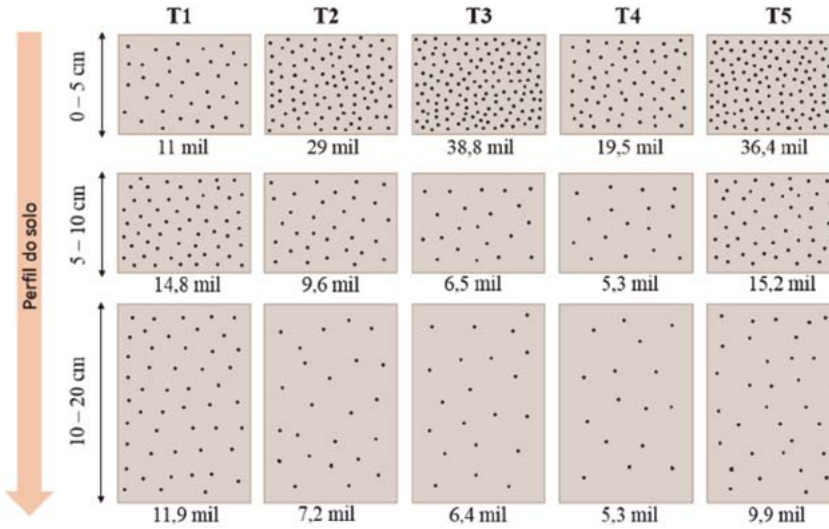


Figura 3. Número de sementes de plantas daninhas por metro quadrado de solo (sementes / m^2), de acordo com a profundidade do solo e o sistema de produção em terras baixas, 2016, Cristal – RS. NOTA: (T1) testemunha - produção tradicional de arroz irrigado, com preparo antecipado do solo e pousio no inverno; (T2) plantio direto de arroz irrigado, com azevém em pastejo no inverno; (T3) sucessão de arroz – soja no verão, com azevém em pastejo no inverno; (T4) rotação de capim-sudão – soja – milho – arroz no verão, com consórcio de azevém – trevo-branco em pastejo no inverno; (T5) campo de sucessão no verão por três anos, seguido de cultivo de arroz, com consórcio de azevém – cornichão – trevo-branco em pastejo no inverno. **Fonte:** Adaptado de Denardin et al. (2018).

No sistema de produção tradicional de arroz irrigado, em que há preparo do solo, as três profundidades estudadas apresentam quantidades similares de sementes de plantas daninhas. Este sistema de preparo do solo pode influenciar na longevidade de algumas espécies de infestantes, como o arroz-vermelho, que apresenta maior persistência no solo em estratos mais profundos.

O preparo do solo interfere em um importante fator que influencia a germinação de muitas plantas daninhas, a luz. Ao menos metade das espécies de plantas daninhas anuais são fotoblásticas positivas (precisam de luz para germinar), especialmente aquelas com pequenas sementes. Possivelmente, o requerimento de luz é uma vantagem evolutiva, considerando que pequenas sementes não teriam energia suficiente para germinar e emergir em camadas mais profundas do solo. Considerando que a luz penetra apenas de 1 a 2 mm do solo, o enterrio, mesmo que superficial, já pode induzir a dormência das sementes.

Outro aspecto em relação ao revolvimento do solo é que pode auxiliar no processo de quebra de dormência de sementes duras (aquelas que apresentam dormência mecânica). O atrito gerado pela movimentação dos minerais do solo pode proporcionar abrasão do revestimento / tegumento das sementes.

O sistema de plantio direto, como nos sistemas T2, T3, T4 e T5 (Figura 3), proporciona maior concentração de sementes em superfície. Neste trabalho, foi observado que, de 60 – 75 % das sementes na camada de 0-20 cm, estão nos primeiros 5 centímetros do solo. A presença de sementes em camadas mais superficiais pode favorecer o decréscimo do banco de sementes mais rapidamente. Em superfície, as sementes ficam mais expostas às condições biológicas, como a predação, e climáticas, já que se tem maior variação de temperatura e umidade (NICHOLS et al., 2015).

Outro exemplo de impacto do manejo do agroecossistema no tamanho do banco de sementes é a influência do manejo das pastagens em áreas de Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPA), mais conhecidos como sistema de Integração Lavoura-Pecuária (ILP) (Figura 4). Intensidades de pastejo moderadas e leves (indicadas pela altura da pastagem) favorecem menores infestações de plantas daninhas, tanto no período do inverno como no verão, resultando em menores bancos de sementes.

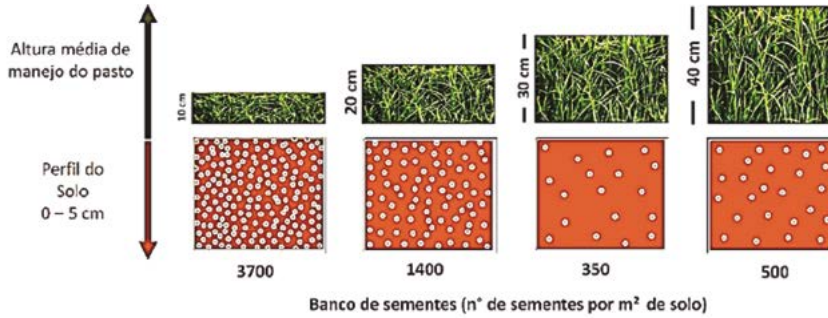


Figura 4. Número de sementes de plantas daninhas por metro quadrado de solo (sementes / m^2), de acordo com intensidade de pastejo em um Sistema Integrado de Produção Agropecuária (SIPA) soja-bovinos de corte (2015) São Miguel das Missões – RS. **Fonte:** Schuster et al. (2016).

Quanto à composição, em geral, poucas espécies representam proporção muito significativa do banco de sementes, na faixa dos 70% a 90% (ZIMDAHL, 2007). A rotação de culturas é um fator dominante que influencia a composição de espécie no banco de sementes. Entre os métodos de controle, o uso de herbicidas é um importante filtro ecológico nos agroecossistemas.

5 APLICAÇÃO DE MODELOS POPULACIONAIS

Muitas vezes, é difícil para os cientistas da área de plantas daninhas aplicarem métodos experimentais para prever a variabilidade nos efeitos observados para as diferentes técnicas e métodos de controle de plantas daninhas, em uma grande gama de situações, bem como entender as consequências do crescimento populacional das plantas daninhas ou as variações no tempo e no espaço. De fato, não é suficiente quantificar os efeitos médios das técnicas e dos métodos de controle de plantas daninhas; os agricultores também precisam saber a probabilidade de sucesso de uma estratégia de gestão e do risco de obter o efeito oposto ao que era originalmente visado.

Uma compreensão abrangente dos efeitos das técnicas e dos métodos de

controle sobre a dinâmica de plantas daninhas pode ser complexa não apenas devido às interações entre os componentes intrínsecos das espécies de plantas daninhas (por exemplo, forma de reprodução, tipo de folha, morfologia), mas também por causa da interação das plantas daninhas com o ambiente (por exemplo, período de emergência, taxa de crescimento, produção de sementes) e o manejo (isto é, decisões do agricultor) ao quais as áreas agrícolas estão sujeitas (por exemplo, semeadura em plantio direto ou convencional, taxas de fertilização, esquemas de rotação de culturas).

A modelagem matemática, que é baseada em razoáveis suposições biológicas, desempenha esse papel em prever a variabilidade nos efeitos observados e fornece uma abordagem alternativa para alguns desses problemas citados acima. A modelagem permite estudar como as variáveis interagem e fazer previsões sobre o que aconteceria se algumas das variáveis fossem alteradas, permitindo uma avaliação multicritério e multiobjectivo das técnicas e dos métodos de controle de plantas daninhas. Além disso, modelos gerados a partir de princípios biológicos mecanicistas podem ser testados contra observações em sistemas; assim, testes para a hipótese são possíveis.

A base para os atuais modelos matemáticos populacionais foi construída por Malthus, Verhulst, Lotka e Volterra. Em 1798, Malthus propôs o modelo exponencial de crescimento:

$$\frac{dN}{dt} = rN$$

Em que: *N* é o tamanho da população e *r* é a taxa de crescimento intrínseca. Este é um modelo irrealista, uma vez que implica crescimento populacional ilimitado; portanto, mesmo o organismo com a reprodução mais lenta cobriria a Terra em um curto período de tempo.

O próximo passo foi realizado por Verhulst, em 1838. Verhulst derivou a equação logística:

$$\frac{dN}{dt} = rN\left(\frac{1-N}{K}\right)$$

A qual introduziu a noção de uma capacidade de carga, *K*, ou seja, a dependência da densidade da população na taxa de crescimento.

No século XX, o próximo passo na evolução dos modelos matemáticos foi

realizado por Lotka e Volterra. O modelo de Lotka-Volterra para competição de espécies é dada pelas equações:

$$\frac{dN_1}{dt} = r_1 N_1 \frac{(K_1 - N_1 - \alpha_{12} N_2)}{K_1}$$

$$\frac{dN_2}{dt} = r_2 N_2 \frac{(K_2 - N_2 - \alpha_{21} N_1)}{K_2}$$

Em que: *Ki* é a capacidade de suporte para a espécie *i*, e *αij* são os coeficientes de competições interespecíficas. Este modelo foi revolucionário porque incluía os efeitos de competição interespecífica, além das propriedades herdadas do modelo logístico de crescimento. O modelo de competição de duas espécies de Lotka-Volterra foi expandido para um modelo de n-espécie de competição, e condições de estabilidade analítica foram encontrados (SCHUSTER et al., 1979). Porém, o modelo logístico foi proposto após estudar organismos simples, incluindo eucarióticos e procarióticos com rápida capacidade reprodutiva; no entanto, a dinâmica populacional de organismos filogeneticamente mais evoluídos, como as plantas daninhas, não é descrita com precisão por este modelo.

Portanto, houve a necessidade de aprimorar esse modelo e também de usar outras técnicas de modelagem para as plantas daninhas. Nos últimos anos, houve grande avanço nesta área e, de maneira geral, podemos dividir a modelagem atual das plantas daninhas em duas categorias: (1) modelos correlativos, e (2) modelos mecanicistas. Em primeiro lugar, os modelos correlativos relacionam registros de distribuição conhecidos para as espécies de plantas daninhas em relação a poucas variáveis previamente determinadas. No segundo grupo, os modelos mecanicistas também podem ser concebidos por dados de distribuição, mas obrigatoriamente fazem o uso de informações de outras fontes, tais como experimentos de fisiologia e conhecimento especializado. A natureza das variáveis e a forma das respostas funcionais usadas nesses modelos são geralmente geradas com base na teoria biológica. Modelos mecanicistas podem ficar muito mais próximos da compreensão da dinâmica das plantas daninhas frente às diferentes técnicas e métodos de controle, porém levam muito mais tempo para ser construídos que os correlativos (±3 anos para os correlativos e >10 anos para os mecanicistas).

Recentemente, Schuster et al. (2018) propuseram um modelo populacional para plantas daninhas: o “modelo crítico de biomassa”, que é um modelo correlativo

que descreve a dinâmica de plantas daninhas em áreas agrícolas e de pastagem. Esse modelo conecta a abundância das plantas daninhas à produção de biomassa das culturas. Para cada ano, a biomassa produzida, *B*, se maior que o nível de equilíbrio específico para cada espécie, *Sc*, a abundância das plantas daninhas, *W*, tende a diminuir no ano seguinte. Contrastante a isso, a abundância tende a aumentar se a produção de biomassa for menor. Além do mais, o impacto é modulado pelo inverso do tempo da relação da *B/Sc*:

$$\widehat{W}_T \propto \left(\frac{S_{c(T-1)}}{B(T-1)}\right)^{a} \times \left(\frac{S_{c(T-2)}}{B(T-2)}\right)^{\frac{a}{2}} \times \ldots \times \left(\frac{S_{c(0)}}{B(0)}\right)^{\frac{a}{T}} = \prod_{t=1}^{T}\left(\frac{S_{c(T-t)}}{B(T-t)}\right)^{\frac{a}{t}}$$

Esse modelo herda o conceito do modelo logístico com a capacidade de carga e introduz a noção da regulação da população de plantas daninhas por um nível crítico específico para cada cultura, que é expresso pela produção de biomassa, ou seja, é necessário determinar um valor de produção de biomassa para cada cultura que, eficientemente, compete com as plantas daninhas e reduz sua taxa de reprodução para níveis inferiores à população atual. Os autores ainda demonstram a necessidade de calcular esse nível crítico de biomassa de cada cultura para diferentes grupos de plantas daninhas, que devem ser agrupadas, por exemplo, em função de características morfológicas, hábito de crescimento, ciclo de vida e tipo de folha e raiz. Além do mais, esse modelo leva em consideração o histórico da área, oferecendo uma visão estatística dinâmica das variações do banco de sementes de plantas daninhas pelo coeficiente de persistência, que modula a resposta em função do inverso do tempo que é esperado que corresponda às sementes de plantas daninhas mais transitórias (isto é, aquelas cujas sementes vivem no solo por <1 ano) ou persistente (isto é, espécies cujas sementes vivem por vários anos).

No estudo de Schuster et al. (2018), está descrito como calcular esse nível crítico de biomassa e do coeficiente de persistência de maneira simples, com o uso de um *Generalized Linear Model* (GLM) com uma distribuição binomial negativa no software R e usando técnicas mais avançadas, é possível calcular o intervalo de confiança desses níveis de equilíbrio de biomassa. No caso, os autores usaram o método Markov chain Monte Carlo (MCMC), que compreende uma classe de algoritmos para a amostragem a partir de uma distribuição de probabilidade. A utilização do algoritmo para a determinação do nível crítico de biomassa e do coeficiente de

persistência descrito acima permite determinar esses coeficientes e comparar, em uma mesma escala, dados/trabalhos com diferentes espécies (de plantas cultivadas e plantas daninhas), submetidas a diferentes práticas agrícolas e variadas condições edafoclimáticas de diferentes regiões do mundo, permitindo encontrar padrões globais, sinergismos ou antagonismos e possíveis gargalos sobre a competição e a persistência dessa competição das culturas e pastagens com as plantas daninhas. Entre outras coisas, isto contribui para a consolidação do conhecimento na área das plantas daninhas. Assim, a modelagem ou a utilização de algoritmos matemáticos pode superar obstáculos e gerar resultados mais robustos.

Um exemplo claro disso é que alguns trabalhos mostram que a semeadura antecipada (antes do fluxo de emergência do banco de sementes) das culturas reduz a ocorrência e a competição com plantas daninhas. A cultura estabelecendo-se antes das plantas daninhas, além de mais competitiva, também exerce efeito físico e, algumas vezes, alelopático, que reduzirá a emergência de plantas daninhas. Porém, esses trabalhos apenas determinam a data de semeadura para uma pequena região e sobre efeito climático que ocorrer durante os dois ou três anos do experimento. Nesse momento, os modelos mecanicistas tornam-se uma ferramenta importante para se testar simulações que irão mostrar como essa estratégia de manejo se comporta com diferentes práticas agrícolas e condições climáticas. De fato, uma semeadura antecipada pode reduzir a infestação de plantas daninhas, em média, mas apenas é eficiente com determinadas práticas agrícola (por exemplo, em semeadura direta) e algumas condições climáticas (por exemplo, condições que não antecipem a emergência do banco de sementes), e, dependendo da configuração, a semeadura antecipada pode resultar no oposto do objetivo inicial. Assim, com uma simulação de vários cenários, por exemplo, com combinações das práticas mais usadas pelos produtores e com as condições climáticas dos últimos 50 anos, pode-se determinar a data ideal para essa antecipação, a probabilidade de sucesso em função da série climática da região e definir as práticas agrícolas e cenários climáticos antagônicos a essa prática de manejo.

Existem ainda modelos mais simples que auxiliam o produtor na tomada de decisões no controle de plantas daninhas, por exemplo, o SeedChaser, que é uma tecnologia baseada em um modelo que prevê a distribuição vertical das sementes de plantas daninhas na superfície do solo, em espaçamentos de 1cm. O modelo

segue sequências selecionadas pelo usuário, as quais levam em consideração os implementos de preparo do solo e os valores iniciais de distribuição de sementes.

Os resultados obtidos no uso deste modelo demonstraram ser promissores para a modelagem de emergência de sementes de plantas daninhas, e pode ainda ser adaptado a qualquer resíduo agroquímico ou incorporado na superfície do solo, tendo aplicações tanto na ciência de plantas daninhas quanto em outras áreas de pesquisa de solo. É possível inserir no modelo até 20 sequências de informações selecionadas pelo usuário, além de 16 implementos agrícolas diferentes (SPOKAS et al., 2007). O SeedChaser é uma ferramenta disponível publicamente pela Internet; entretanto, é pouco utilizada no Brasil.

Outro software, o WeedCast, foi desenvolvido pela Universidade de Wincorsin para auxiliar na tomada de decisão para o controle de plantas daninhas. O modelo prevê três características relacionadas ao desenvolvimento de plantas daninhas: potencial de emergência, tempo de emergência e altura de mudas. Os dados inseridos pelo usuário levam em consideração a planta daninha de interesse e/ou visualizada na área, o tipo de solo, as informações da safra, do sistema de plantio adotado e o conteúdo de água do solo com base no ano anterior à safra. Os resultados são exibidos em uma planilha e podem ser representados graficamente no programa. O software é escrito em Java e é gratuito para download e uso; entretanto, seu uso é pouco difundido no Brasil.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Plantas daninhas apresentam diversas estratégias de sobrevivência. Entre elas, como visto neste capítulo, a capacidade de se reproduzir por vias alternativas à seminífera. Além da reprodução, estes organismos vegetais estão adaptados a se dispersarem. Entender o ciclo desde a germinação de um dissemínulo até à formação de uma planta adulta reflete no entendimento do bando de sementes e da comunidade infestante de plantas daninhas locais.

REFERÊNCIAS

BRACCINI, A.L. Banco de Sementes e Mecanismos de Dormência em Sementes de Plantas Daninhas. In: OLIVEIRA JÚNIOR, R.S., INOUE, M.H. (Ed.). **Biologia e manejo de plantas daninhas**. Curitiba: Omnipax, 2011. p.1-36.

BRIGHENTI, A. M.; OLIVEIRA, M.F. Biologia de plantas daninhas. In: OLIVEIRA JÚNIOR, R.S.; INOUE, M.H. (Ed.). **Biologia e manejo de plantas daninhas**. Curitiba: Omnipax, 2011. p.1-36.

CARMONA, R. Banco de sementes e estabelecimento de plantas daninhas em agroecossistemas. **Planta Daninha**, v. 13, p. 3-9, 1995.

CARVALHO, L.B. **Plantas Daninhas**. Lages-SC: Editado pelo autor, 2013.

CUMMINS, C. et al. A separated vortex ring underlies the flight of the dandelion. **Nature**, v. 562, p. 414–418, 2018.

DENARDIN, L.G.O. et al. In: CARMONA, F.C. et al. **Sistemas Integrados de Produção Agropecuária em Terras Baixas**. Porto Alegre: Gráfica e Editora RJR, 2018. p.39-100.

FERRARI, M.P. et al. **Propagação vegetativa de espécies florestais**. Documentos 94. Colombo – PR: Embrapa Florestas, 2004.

HARTMANN, H.T., et al. **Plant propagation: principles and practices**. 8.ed. New Jersey: Englewood Clipps, 2011.

LEONEL, M.; CEREDA, M.P. Caracterização físicoquímica de algumas tuberosas amiláceas. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 22, p. 65-69, 2002.

LEWIS, H. **Segredos da propagação de plantas**. São Paulo: Nobel, 1996.

LORENZI, H. **Plantas Daninhas do Brasil**: Terrestres, Aquáticas, Parasitas, Tóxicas e Medicinais. 4.ed. Nova Odessa: Plantarum, 2008.

LOTKA, A.J. **Elements of Mathematical Biology**. New York: Dover, 1956.

MAIA, N.B. et al. Influência de tipos de rizomas de multiplicação no crescimento de cúrcuma. **Bragantia**, v.54, p. 33-37, 1995.

MALTHUS, T.R. **An essay on the Principal of Population**. New York:Penguin Books, 1798.

MEDEIROS, R.B.; FOCHT, T. Invasão, prevenção, controle e utilização do capim-annoni-2 (*Eragrostis plana* Nees) no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuaria Gaúcha**, v. 13, p. 105-114, 2007.

NICHOLS, V. et al. Weed dynamics and conservation agriculture principles: a review. **Field Crops Research**, v.183, p. 56-68, 2015.

SPOKAS, K. et al. SeedChaser: Vertical soil tillage distribution model. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 57, p. 62-73, 2007.

SCHUSTER, P. et al. On *w*-limit sets for competition between three species. **SIAM Journal on Applied Mathematics,** v. 37, p. 49-54, 1979.

SCHUSTER, M.Z. et al. Grazing intensities affect weed seedling emergence and the seed bank in an integrated crop–livestock system. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 232, p. 232-239, 2016.

SCHUSTER, M.Z. et al. Crop and grassland competition in weed management: a new formalism, the biomass equilibrium model. **European Journal of Agronomy**, 2018; DOI https://doi.org/10.1101/572701.

SCHWEIZER, E.E.; ZIMDHAL, R.I. Weed seed decline in irrigated soil after rotation

of crops and herbicides. **Weed Science**, v. 32, p. 84-89, 1984.

VIVIAN, R. et al. Dormência em sementes de plantas daninhas como mecanismo de sobrevivência – breve revisão. **Planta Daninha**, v. 26, p. 695-706, 2008.

VERHULST, P.F. Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement, Correspondance Mathématique et Physique. **Journal of Biological Physics**, v. 3, p. 183-192, 1838.

VOLTERRA, V. Fluctuations in the abundance of a species considered mathematically. **Nature**, v. 118, p. 558 -560, 1926.

_____. Variations and fluctuations of the number of individuals in animal species living together. In: CHAPMAN, R.N. **Animal Ecology**. New York:McGraw–Hill, 1931. p. 4-51.

XAVIER, A. et al. **Silvicultura clonal: princípios e técnicas**. Viçosa-MG: Imprensa Universitária, UFV, 2009.

YAMASHITA, O.M. et al. Germinação das sementes de *Conyza canadensis e Conyza bonariensis* em função da qualidade de luz. **Planta Daninha**, v. 29, p. 737-743, 2011.

ZIMDAHL, R.L. **Fundamentals of Weed Science**. 3.ed. Fort Collins: Academic Press, 2007.

ZUFFELLATO-RIBAS, K.C.; RODRIGUES, J.D. Aplicação de ácido indol butírico e co-fatores do enraizamento em estacas herbáceas de eucalipto. SBPN – **Scientfic Journal**, p. 134-136, 2001.

CAPÍTULO 3

ÍNDICES FITOSSOCIOLÓGICOS APLICADOS NA CIÊNCIA E NA GESTÃO DAS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE PLANTAS DANINHAS

Marcos Antonio Kuva[1]
Tiago Pereira Salgado[1]
Pedro Luís da Costa Aguiar Alves[2]

[1]Doutor, Herbae Consultoria e Projetos Agrícolas Ltda.; [2]Doutor, Professor - Unesp – Câmpus da Jaboticabal.

1 INTRODUÇÃO

A palavra fitossociologia tem como origem *Phytos*, que significa planta, e sociologia no sentido de grupos ou agrupamentos. Ao longo do tempo, algumas definições foram dadas incorporando novos elementos, de acordo com sua utilização em estudos e pesquisas. No Brasil, a fitossociologia teve seus primeiros estudos efetuados na década de 40, mas somente na década de 80 firmou-se como área de pesquisa das mais relevantes em ecologia, com quantidade de trabalhos que permitiu bons diagnósticos de parte da estrutura de diversos biomas brasileiros (MANTOVANI, 2005).

Segundo Rodrigues e Gandolfi (1998), a fitossociologia é o ramo da ecologia vegetal que estuda, descreve e procura compreender a associação existente entre espécies vegetais na comunidade, as quais, por sua vez, caracterizam as unidades fitogeográficas como resultado das interações das espécies vegetais entre si e com o meio ambiente (solo e clima). Para Martins (1989), a fitossociologia estuda as inter-relações de espécies vegetais na comunidade, em dimensão espaço temporal, atribuindo índices quantitativos da composição, estrutura, funcionamento, dinâmica, história, distribuição e relações edafoclimáticas da comunidade vegetal. Uma definição mundialmente aceita foi apresentada durante o Congresso Mundial de Botânica, realizado em Paris, em 1954, no qual pesquisadores definiram como o estudo das comunidades vegetais do ponto de vista florístico, ecológico e histórico.

Neste capítulo, em suma, seguiremos com a seguinte definição e conteúdo, incluindo a interação com atividades do homem: “fitossociologia é um ramo da ecologia vegetal complementar à botânica e que se dedica ao estudo de comunidades vegetais naturais ou modificadas pelo homem”. “Visa a obtenção de variáveis quantitativas, ou seja, numéricas, que possam caracterizar a vegetação de diferentes ecossistemas naturais, regiões, estados, municípios e, também, de ecossistemas modificados pelas atividades econômicas do homem (agroecossistemas).

Baseado na definição e no conteúdo, um fitossociólogo dedica-se, portanto, a estudar as comunidades vegetais quanto à composição, diversidade, distribuição, classificação e relações com características de solo e clima da região onde está inserida. Surgiu da necessidade de se comparar vegetação de duas ou mais áreas ou de uma área ao longo do tempo e, para isso, fez-se necessário o desenvolvimento e

registro de variáveis numéricas para cada espécie presente nas diferentes áreas ou em diferentes momentos na mesma área.

Para que a comparação regional ou temporal acima citada seja confiável, é necessária a obtenção de variáreis numéricas que são os índices fitossociológicos. Para isso, alguns pontos são fundamentais; (1) – definição da unidade amostral; (2) – definição do critério de inclusão; (3) – registro de variáreis numéricas para indivíduos incluídos, e (4) – cálculo de índices fitossociológicos. Uma unidade amostral pode ser em parcelas com figura geométrica de dimensões padronizadas, pontos quadrantes, caminhamento padrão, etc. A disposição das parcelas pode ser ao acaso, sistemática ou contígua (Figura 1).

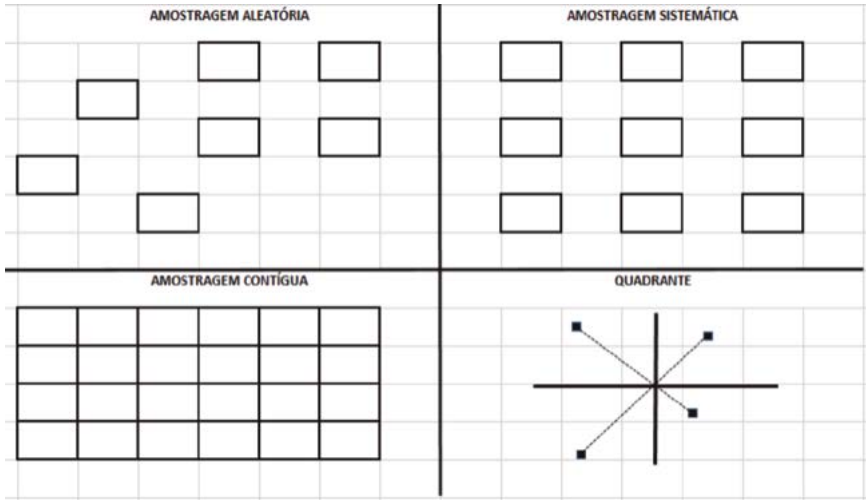


Figura 1- Padrão de organização de unidades de amostragem por parcelas e por quadrante.

Quando o foco da amostragem são plantas de pequeno ou médio porte, como plantas daninhas, um procedimento bastante utilizado é o lançamento aleatório de quadrados vazados de amostragem (Figura 2). O critério de inclusão depende do objetivo da atividade, como, por exemplo, todas as plantas abrangidas pela unidade amostral, somente indivíduos a partir de um determinado estágio, somente plantas monocotiledôneas, somente eudicotiledôneas ou, em agroecossistemas,

somente plantas consideradas daninhas. Os indivíduos abrangidos pela unidade amostral e que atendem ao critério de inclusão, devem ser registrados com variáveis numéricas. Por exemplo, número de indivíduos da espécie, massa seca ou fresca do total de indivíduos da mesma espécie, altura, diâmetro do caule ou copa, nota de cobertura a partir de uma escala numérica previamente estabelecida e validada, etc. Os principais índices fitossociológicos que caracterizam a estrutura horizontal são: Densidade, Frequência, Dominância, Valor de Importância e Valor de cobertura. Existem também estudos e índices para estrutura vertical e de regeneração, mas estes são mais importantes para formações florestais naturais e não serão abordados neste capítulo. Em complementação aos índices fitossociológicos da estrutura horizontal, existem também os índices de similaridade, equitabilidade, diversidade de espécies e riqueza de espécies.

Quando a fitossociologia se alia e se aplica às atividades do homem, tais como: urbanismo, paisagismo, agricultura, pecuária, silvicultura, apicultura, ecoturismo e engenharia do ambiente, ganha foros de ciência aplicada, trazendo enormes benefícios para a sociedade (CHAVES et al., 2013). Neste capítulo, dedicaremos atenção especial na fitossociologia e em seus índices, quando aplicados à agricultura, pecuária e silvicultura, com ênfase na interação com a ciência das plantas daninhas (Matologia ou Herbologia).

Figura 2- Quadrado vazado de amostragem (0,50 x 0,50 metros) utilizado para amostragem de plantas daninhas de pequeno porte.

2 ÍNDICES FITOSSOCIOLÓGICOS DA ESTRUTURA HORIZONTAL

São índices ou indicadores utilizados para caracterizar a estrutura de uma comunidade vegetal quanto à disposição, organização e arranjo dos indivíduos dentro da comunidade vegetal. A seguir, apresentamos os principais índices fitossociológicos:

2.1 Abundância, densidade absoluta e densidade relativa

Abundância é o número de indivíduos por espécie amostrados na comunidade, ao passo que densidade representa a participação das diferentes espécies dentro da comunidade por unidade de área (densidade absoluta) ou em relação ao total de espécies (densidade relativa) e são calculados pelas fórmulas:

$$Dei = \frac{n}{A}$$

Em que: *Dei* = densidade absoluta; *n* = número de indivíduos de determinada espécie e *A* = unidade de área (hectares, por exemplo)

$$DeRi = \left(\frac{n}{N}\right) * 100$$

Em que: *DeRi* = densidade relativa; *n* = número de indivíduos de determinada espécie e *N* = número total de indivíduos considerando todas as espécies encontradas

2.2 Frequência absoluta e frequência relativa

Representa a distribuição espacial das espécies na área e indica o número de unidades amostrais em que ocorre, pelo menos, um representante de determinada espécie em relação ao número total de unidades amostrais. Pode ser expressa na forma porcentual (frequência absoluta) dada pela fórmula:

$$FAi = \left(\frac{UAi}{UA}\right) x\ 100$$

Em que: *FAi* = frequência absoluta; *UAi* = número de unidades amostrais onde ocorre a espécie *i*; *UA* = número total de unidades amostrais.

A frequência pode também ser expressa na forma relativa, se aplicada a fórmula abaixo:

$$FRi = \left(\frac{FUAi}{\sum FA}\right) x\ 100$$

Em que: *FRi* = frequência relativa; *F UAi* = Frequência absoluta da espécie *i*; *∑FA* = somatória da frequência absoluta de todas as espécies amostradas.

2.3 Dominância e Dominância relativa

Representa a taxa de ocupação do ambiente pelos indivíduos de uma determinada espécie, por unidade de área. Assim como os índices anteriores, pode ser expressa na escala absoluta (Dominância Absoluta) ou relativa (Dominância Relativa).

A dominância absoluta pode ser definida como a área basal total projetada ao solo de uma determinada espécie, por unidade de área, calculada pela fórmula:

$$DoAi = \left(\frac{ABi}{A}\right)$$

Em que: *DoAi* = Dominância absoluta da espécie *i*; *ABi* = Área basal da espécie *i*; *A* = unidade de área (ha).

Quando expressa na escala relativa, a dominância representa a porcentagem da área basal projetada ao solo de uma determinada espécie, em relação à soma da área basal de todas as espécies detectadas pela amostragem. Seu cálculo é realizado pela fórmula:

$$DoRi = \left(\frac{ABi}{ABt}\right) x\ 100$$

Em que: *DoRi* = Dominância relativa da espécie *i*; *ABi* = Área basal da espécie *i*, *ABt* = soma da área basal de todas as espécies detectadas na amostragem.

Neste item, cabe uma explicação do que representa "*área basal projetada ao solo*", contida nas definições de dominância absoluta e relativa. Trata-se de uma maneira de estimar a biomassa seca ou fresca de uma espécie, em uma determinada área, e qual a sua proporção em relação às demais espécies. Como a determinação da biomassa, na maioria dos casos, é inviável devido à pouca praticidade, pode-se recorrer a avaliações visuais e à atribuição de porcentagem de cobertura ou outra escala de nota de cobertura da área ou parcela, desde que realizada por pessoas treinadas e com critérios padronizados.

2.4 Valor de cobertura

É a somatória dos índices relativos de densidade (DeR) e de dominância (DoR) das espécies detectadas na amostragem, numa comunidade vegetal, calculado pela fórmula:

$$VCi = DeRi + DoRi$$

Em que: *CVi* = valor de cobertura da espécie i; *DeRi* = Densidade relativa da espécie i; *DoRi* = dominância relativa da espécie i.

Também pode ser expressa na escala relativa, sendo denominada de Valor de cobertura relativo. Neste caso, representa a participação em VC de uma determinada espécie, em relação à somatória de VC de todas as espécies encontradas pela amostragem. A fórmula para seu cálculo é:

$$VCRi = \left(\frac{VCi}{VCt}\right) x\ 100$$

Em que: *VCRi* = valor de cobertura da espécie i; *VCIi* = valor de cobertura da espécie i; *VCt* = somatória do valor de cobertura de todas as espécies detectadas pela amostragem.

2.5 Índice de valor de importância e importância relativa

Trata-se da somatória da densidade relativa, frequência relativa e dominância relativa das espécies detectadas na amostragem de uma comunidade vege-

tal, calculado pela fórmula:

$$IVIi = DeR + FR + DoR$$

Também pode ser expressa na escala relativa, sendo denominada de Importância Relativa. Neste caso, representa a participação em IVI de uma determinada espécie, em relação à somatória de IVI de todas as espécies encontradas pela amostragem. A fórmula para seu cálculo é:

$$IRi = \left(\frac{IVIi}{IVIt}\right) x\ 100$$

Em que: *IRi* = importância relativa da espécie i; *IVIi* = índice de valor de importância da espécie i; *IVIt* = somatória do índice de valor de importância de todas as espécies detectadas pela amostragem.

2.6 Índice e padrão de agregação

De posse dos dados de abundância e de frequência das espécies, é possível calcular índices que indicam padrões de distribuição para as populações numa determinada área ou região, quando a amostragem é realizada por meio de parcelas amostrais, alocadas numa distribuição sistemática ou contígua. Um método bastante utilizado avalia a razão (I) entre a variância (s2) e a média (x) estimada da distribuição de indivíduos (abundância) de uma população, conforme equação abaixo;

$$s^2 = \frac{\sum(xi - \bar{x})^2}{N - 1}$$

Em que: *xi* = n° de indivíduos na i-ésima parcela; x^{-}= média do n° de indivíduos por unidade amostral, e *N*: n° de unidades amostrais. Se $I = s^2 / x^{-} > 1$ (padrão distribuição agregado); Se $I = s^2 / x^{-} = 1$ (padrão distribuição aleatório); Se $I = s2 / x^{-} = 1$ (padrão distribuição uniforme).

Outro índice de distribuição utilizado é o *Id* proposto por Morisita (1959) apud Brower e Zar (1984), definido pela seguinte equação:

$$Id = n\,X\,\frac{\sum xi^2 - N}{N\,(N-1)}$$

Em que: *n*: n° de unidades amostrais; N: é o número total de indivíduos contados em todas as n unidades amostrais; X^2: é o quadrado do número de indivíduos na i-ésima parcela. Se Id = 1,0 (distribuição aleatória); Se Id < 1,0 (distribuição uniforme); Se Id = 0 (distribuição perfeitamente aleatória); Se Id > 1 (distribuição agregada com maior agregação quando Id = n).

Por outro lado, quando a amostragem é realizada sem parcelas amostrais e, sim, por estabelecimento de um número de pontos amostrais aleatórios e medição de distância até os dois indivíduos mais próximos (Método de Holgate), o padrão de distribuição é dado pelo índice A, calculado pela fórmula:

$$A = \frac{\sum(\frac{d}{d'^2})}{n}$$

Em que: *A* – índice do Holgate; *d* = distância do ponto amostral até o indivíduo mais próximo; *d´*= distância do ponto amostral até o segundo indivíduo mais próximo; *n* = número de pontos amostrais. Se A = 0,5 (distribuição é aleatória); Se A > 0,5 (distribuição agregada); Se A < 0,5 (distribuição uniforme).

O padrão agregado pode ser desmembrado em: a) agregado-aleatório, quando os grupos formados se distribuem aleatoriamente; b) agregado-uniforme, quando os grupos estão distribuídos uniformemente, e c) agregado-agregado, quando os grupos estão concentrados numa região (ODUM, 1988). A amostragem realizada em populações agregadas deve ser mais criteriosa do que em populações uniformemente distribuídas. No caso específico de comunidades de plantas daninhas, o mais comum é que a distribuição apresente padrão agregado com diferentes índices de agregação (RADOSEVICH; HOLT, 1984).

2.7 Diversidade e índice de diversidade de Shannon-Wiener (H')

A diversidade de espécie num determinado local deriva do conhecimento da riqueza de espécies e da abundância ou densidade das mesmas neste local. A

riqueza representa o número de espécies presentes na área e que foram detectadas pela amostragem. De acordo com a abrangência e a variabilidade da área analisada, a diversidade de espécies foi classificada por Wittaker em alfa, beta e gama (MAGURRAN, 1988).

A diversidade alfa refere-se à riqueza de espécies e suas abundâncias numa área determinada ou numa comunidade, como, por exemplo, um cerrado ou uma área ocupada por determinada cultura agrícola. A diversidade beta refere-se à diversidade entre hábitats medindo a diferença entre elas de acordo com a riqueza e a abundância das espécies, como, por exemplo, as diferenças entre matas e cerrado, ou entre cultivos em sistemas de semeadura direta na presença de palhada ou sistemas com preparo de solo mediante arações e operações com grade. Por fim, a diversidade gama refere-se à riqueza de espécies e suas abundâncias em uma determinada região com todos os seus hábitats e comunidades presentes. É o somatório das espécies e suas abundâncias em todas as matas, campos, cerrados, cultivos agrícolas contidos na região.

O índice de diversidade mais utilizado é o de Shannon (H'), que pressupõe coleta aleatória de amostras numa população grande e que todas as espécies presentes foram detectadas pela amostragem. É baseado na abundância e na proporção das espécies na comunidade e calculado pela fórmula:

$$H' = -\sum_{i=1}^{s} pi \,.\, \ln(pi)$$

Em que: *s* = é o número de espécies na amostra; *pi* = densidade relativa de cada espécie; *ln* = logaritmo neperiano.

Quanto maior o índice, maior será a diversificação da comunidade quanto à composição de espécies.

2.8 Equitabilidade e índice de Pielou (J)

Esse índice trata do equilíbrio na distribuição do número de indivíduos (abundância) entre as espécies que compõem a comunidade. Na condição de equilíbrio total, o índice J é igual a 1, e quanto mais se aproxima de zero, maior a discre-

pância entre as espécies (MARRUGAN, 1988; FELFILI; VENTUROLI, 2000). O índice J é calculado pela formula:

$$J = \frac{H'}{H'max}$$

Em que: *H'* = Índice de diversidade de Shannon; *H'max = ln (S)*; *S* = número de espécies amostradas.

2.9 Similaridade e índices de similaridade

Existem ainda os índices de similaridade que servem para comparar a composição de espécies entre diferentes áreas, parcelas ou hábitats. São índices considerados qualitativos, por não considerar o número de indivíduos de cada espécie, mas somente a lista de espécies detectadas pela amostragem. Os dois principais índices de similaridade são: Índice de Jaccard – (Sj) e índice de Sorensen (Ss). São calculados pela razão entre o número de espécies comuns às duas áreas e a soma do número de espécies comuns nas duas áreas, espécies exclusivas da área 1 e espécies exclusivas da área 2. O índice de Sorensen é muito semelhante ao de Jaccart, mas contempla uma ponderação, atribuindo o dobro do peso para o número de espécies comuns. Vide abaixo as fórmulas para o cálculo dos índices de Jaccart e Sorensen:

$$Sj = \frac{a}{a+b+c} \qquad Ss = \frac{2a}{2a+b+c}$$

Em que: *a* = número de espécies comuns às duas áreas; *b* = número de espécies exclusivas da área 1; *c* = número de espécies exclusivas da área 2.

3 FITOSSOCIOLOGIA NA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS

A composição da comunidade de plantas daninhas em um agroecossistema é dependente das características de solo, clima, época de cultivo e das práticas agronômicas, tais como o manejo de solo, rotação de culturas e aplicação de her-

bicidas (GODOY et al, 1995; VOLL et al., 2001). Segundo Pitelli (2000), os índices fitossociológicos são importantes para analisar os impactos que os sistemas de manejo e as práticas agrícolas exercem sobre a dinâmica de crescimento, composição e ocupação de comunidades de plantas daninhas em sistemas agrícolas.

Numa comunidade de plantas daninhas, nem todas as espécies têm a mesma importância ou participação na interferência imposta ao desenvolvimento e à produtividade da cultura. Normalmente, existem espécies dominantes, que ocasionam a maior parte dos danos. Existem as secundárias, presentes numa menor densidade e cobertura, e as acompanhantes, cuja presença é ocasional e, portanto, não resultam em problemas econômicos aos cultivos (FERNANDEZ-QUINTANILHA et al., 1991). Essa medida do grau de importância das espécies é dada pelos índices fitossociológicos.

Os levantamentos fitossociológicos, quando realizados pontualmente, refletem a composição da comunidade de plantas em função das características climáticas e edáficas da região (sistemas naturais) e também em função da ocupação econômica e de manejo nos anos anteriores (sistemas antrópicos). Porém, quando os levantamentos fitossociológicos são realizados com periodicidade, os dados coletados e os índices calculados servem como indicadores da variação populacional e da composição de comunidades vegetais (indicadores da dinâmica populacional).

Alguns trabalhos têm-se dedicado ao cadastramento e à ordenação de espécies de plantas daninhas, associada a determinadas culturas agrícolas inserida em regiões definidas por meio dos índices fitossociológicos, como são os casos dos trabalhos de Macedo et al. (2003), em áreas de pós-colheita de milho; Lara et al. (2003), Tuffi Santos et al. (2004), Inoue et al. (2012), Caporal e Boldrini (2017), em áreas de pastagens, Kuva et al. (2007), Kuva et al. (2008), Oliveira e Freitas (2008) e Ferreira et al. (2011) em áreas de cana-de-açúcar, Brighenti et al. (2003) e Adegas et al. (2010) em cultivos de girassol e Gomes et al. (2010) na cultura da bananeira, no Vale do Ribeira, no Estado de São Paulo.

Outros trabalhos que utilizaram índices fitossóciológicos, tiveram como foco principal comparar a composição da comunidade infestante em áreas sob diferentes modalidades de preparo do solo e manejo da palhada, em área de cereais (SCHAFFRATH et al., 2007), avaliar os efeitos da rotação de culturas em arrozais (ERASMO et al., 2004) e Rodrigues et al. (2012), ou avaliar a flora de plantas daninhas na cultura do feijão, em diferentes épocas do ano (TAVARES et al., 2013). Os

índices fitossociológicos foram utilizados por Jekelaitis et al. (2003), para comparar as composições específicas de comunidades infestantes da cultura do milho e também para estudar a dinâmica populacional na cultura do milho e do feijão, sob sistemas de plantio direto e convencional.

Um grande exemplo da aplicação dos índices fitossociológicos ocorreu no plano de monitoramento ambiental, pós-liberação comercial, de culturas geneticamente modificadas, tolerantes ao herbicida glifosato, nas safras de 2005/2006 a 2010/2011. Neste plano, foram realizados estudos durante 5 anos, em 9 municípios localizados em diferentes regiões produtoras de soja (São Luís Gonzaga-RS; Ponta Grossa-PR; Londrina- PR; São Gabriel D'oeste-MS; Rondonópolis-MT; Sorriso-MT; Santa Helena de Goiás-GO e Barreiras-BA). Em cada local, foram avaliados três sistemas de produção de soja de primeira safra (Soja Roundup Ready / Herbicida Roundup Ready – SRR/HRR; Soja Roundup Ready / Herbicida Convencional – SRR / HCV e Soja Convencional / Herbicida Convencional – SCV / HCV). Neste estudo, considerando dados de banco de sementes, a diversidade de espécies (Índice de Shannon – H') encontrada foi semelhante entre os três sistemas de manejo, mas o número médio de indivíduos (densidade) e o número médio de espécies (riqueza) foram reduzidos ao longo dos anos, independentemente do sistema de manejo adotado (PAVANI et al., 2014). Por outro lado, considerando dados de flora emergida, o índice de diversidade de Shannon – H' mostrou que, no sistema de manejo, Soja Roundup Ready e Herbicida Roundup Ready, a composição foi menos diversificada, evidenciando maior eficácia e maior abrangência de espectro de controle pelo herbicida glifosato (ALVES et al., 2014). Após cinco anos de estudos, não foi possível identificar focos de seleção de flora ou de populações resistentes ao glifosato, uma realidade nos dias atuais.

A organização de comunidades de plantas daninhas, associada a determinada cultura ou numa determinada região, de acordo com o grau de similaridade quanto à composição e participação dos componentes, pode ser útil para o planejamento das estratégias de controle, em especial no processo de escolha dos tratamentos químicos com herbicidas. O coeficiente de similaridade proposto dor Sorensen (Ss) é o mais utilizado para comparar e agrupar regiões ou parcelas de acordo com a composição de espécies e foi utilizado, por exemplo, nos trabalhos de Adegas et al. (2010) e de Gomes et al. (2010). Contudo, ele não considera a densidade ou a

dominância de cada espécie, mas somente presença ou ausência, e as comparações são limitadas às duas áreas. Na cultura da cana-de-açúcar, foram realizadas pesquisas (KUVA et al., 2008; FERREIRA et al., 2011; SQUASSONI et al., 2012) buscando obter essa organização das unidades de produção (blocos de colheita), organizando de acordo com padrões de infestação de espécies de planta daninha, utilizando técnicas de estatística multivariada (análise de Clustter, análise discriminante e análises de componentes principais) e considerando os índices fitossociológicos de espécies importantes agronomicamente para a cultura, ou seja, contemplando a magnitude das populações. Os resultados obtidos puderam contribuir para a escolha da melhor modalidade de manejo.

A distribuição horizontal de plantas daninhas apresenta diferentes padrões, dentre os quais o agregado, com diferentes níveis de agregação. Como descrito anteriormente neste capítulo, estes padrões são caracterizados por índices de agregação que, por sua vez, derivam da abundância e da frequência das espécies.

O padrão agregado que as populações ou comunidades de plantas daninhas apresentam, em alguns casos, pode ser explorado para adoção de aplicação localizada ou em taxas variadas de herbicidas, mediante geração de mapas de distribuição e desenvolvimento de tecnologias de aplicação adequadas. Utilizando índices de agregação, Shiratsuchi (2001), em seu experimento na cultura da soja, obteve valores elevados para as principais espécies ou grupo de espécies. Por meio de técnicas da geoestatística, confeccionou mapas de classes de infestação e obteve a economia de 22% em herbicidas, aplicando de forma diferencial, baseando-se em dados de banco de sementes, e de 18% e 44%, baseando-se em dados de plantas emergidas. Baio (2000) avaliou metodologias para obtenção de mapas de distribuição das plantas daninhas.

Baseando-se na variabilidade espacial das plantas daninhas mapeadas, criou um mapa de prescrição com quatro dosagens diferentes de herbicidas e obteve controle satisfatório das mesmas com a economia de 31,6% de herbicida, quando comparado à aplicação em área total. Esquerdo (2002) obteve a redução de 69,52% na quantidade de herbicida utilizado com a aplicação localizada, em área comercial de 4,1 há, baseando-se em mapas de distribuição de plantas daninhas, cujo padrão era extremamente agregado. No exterior, vários trabalhos dedicaram-se à geração de mapas de distribuição de plantas daninhas, sustentados no banco de sementes (BENOIT et

al., 1992), na flora de plântulas emergentes (CARDINA et al., 1997; JOHNSON et al., 1996) ou buscando verificar a correspondência entre mapas de distribuição horizontal, baseado em dados de sementes e de flora emergente (CARDINA et al., 1996).

Com a disponibilização da tecnologia de imagem por satélites (NDVI) para a agricultura, e com a evolução da tecnologia de registro de imagens com câmeras multiespectrais, hiperespectrais e térmicas, acopladas a diferentes veículos aéreos: aviões, helicópteros e aeronaves não tripuladas (VANTs) de asa fixa ou rotativas (drones), pesquisas e ações têm ocorrido no sentido de desenvolver algoritmos capazes de identificar grupos ou espécies de plantas daninhas e de fornecer informação sobre a distribuição horizontal das comunidades e populações. Ou seja, tem-se buscado dar praticidade e agilidade nos levantamentos de plantas daninhas a fim de transformar tal levantamento num serviço aplicável e torná-lo disponível aos produtores.

As imagens de NDVI de uma determinada área são registradas periodicamente, com frequência que varia de 5 a 16 dias, dependendo do satélite, e são disponibilizadas em plataformas digitais (Climate FieldViewTM, Cyan® Agroanalytics, Taranis, Gamaya, entre outros). As manchas com biomassa acima do normal para o desenvolvimento da cultura são indicadas como possível presença de plantas daninhas (anomalia). As confirmações das causas das anomalias são realizadas por vistorias presenciais ou por meio de registro de imagens com aeronaves tripuladas ou não, equipadas com câmeras multiespectrais ou hiperespectrais. Algumas dessas plataformas já possuem algum nível de inteligência artificial capaz de apontar a presença de algumas espécies, família ou gênero de plantas e apontar a proporção em que cada uma delas ocorre (Figura 3). Com utilização maciça e confirmação no campo, essa tecnologia tende a ganhar cada vez mais acurácia e aplicabilidade em escala.

Devido à velocidade de deslocamento e autonomia de voo, as aeronaves tripuladas são mais indicadas para áreas extensas e de fácil acesso, sem presença de obstáculos. Porém, é necessária alguma tecnologia embarcada para eliminar distorções nas imagens devido à velocidade de deslocamento e altura de voo. Em relação aos Vants, apresentam maior versatilidade para áreas menores e de difícil acesso, podendo realizar voos mais rasantes. Por outro lado, o grande limitador é a baixa autonomia de suas baterias que precisaram ser leves e ajustar-se à potência de seus motores.

Seja com Vants ou aeronaves tripuladas, o objetivo é compor um mosaico de imagens verticais (Figura 4 A) e gerar um modelo tridimensional, ou seja, transformar várias fotos parcialmente sobrepostas na única imagem tridimensional de uma

área. Segundo Bosak (2009), a sobreposição normalmente é de 55% a 65% sobre as fotos tiradas longitudinalmente e de 20% a 40% sobre as fotos sobrepostas lateralmente, e o voo ocorre em “zigue-zague” (Figura 4 B).

Figura 3 – Conteúdo da plataforma digital da Taranis, apresentando um conjunto de mapas (NDVI), fotografias capturadas com câmeras de altíssima resolução (AI2), registrado com auxílio de drones e aplicativo de celular, fornecendo proporção de plantas daninhas resultante de algoritmos de reconhecimento de planta.

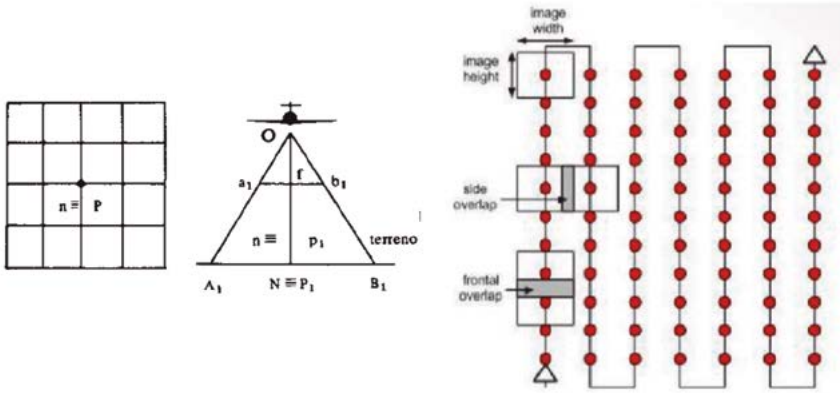


Figura 4 – Figura ilustrando captura de imagens aéreas verticais e plano de voo com detalhamento de sobreposição longitudinal de lateral das fotografias individuais.
Fonte: Adaptado de Araújo e Accioly (2019).

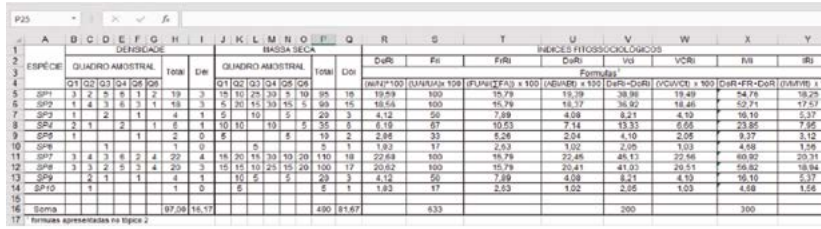
4 CÁLCULO DOS ÍNDICES FITOSSOCIOLÓGICOS EM COMUNIDADES DE PLANTAS DANINHAS CASOS HIPOTÉTICOS

4.1 Planilha fitossociológica

Os índices fitossociológicos, normalmente, são calculados por meio de planilhas fitossociológicas, utilizando-se de dados coletados no campo (densidade e dominância). A densidade é obtida por meio de contagem de indivíduos da mesma espécie, abrangidos pela amostragem; e a dominância, por meio de coleta e pesagem do total de indivíduos da mesma espécie. Para melhor compreensão do significado prático dos índices fitossociológicos e da forma como são calculados, aqui apresentamos exemplos de duas planilhas fitossociológicas com dados hipotéticos. Para isso, pressupomos uma área e levantamentos de plantas daninhas em duas épocas: no ano 1 (Quadro 1A) e no ano *n* (Quadro 1B). Supomos ainda que, entre o ano 1 e o ano *n*, alguma alteração significativa de manejo tenha sido realizada e adotada sistematicamente. (Ex: introdução de culturas transgênicas e utilização com alta frequência de herbicidas outrora não seletivos, manutenção de palhada sobre o solo por alteração de sistema de preparo ou eliminação de queimada, alteração no sistema de rotação de culturas, etc.).

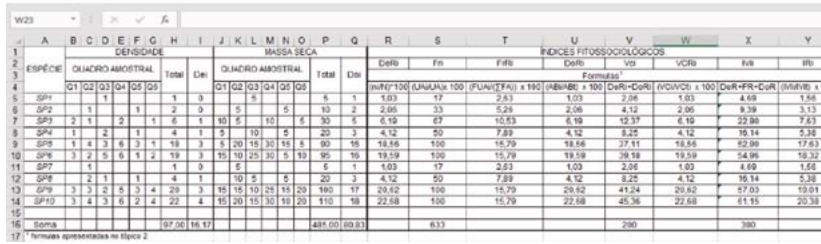
No ano 1, pelos índices fitossociológicos calculados, a área é caracterizada pela presença de dez espécies, sendo as mais importantes (maior IR); SP7, SP8, SP1 e SP2. Esse maior IR é decorrente da maior densidade, dominância, frequência e valor de cobertura. O efeito de alterações inseridas no sistema de manejo sobre a flora de plantas daninhas pode ser analisado qualitativa e quantitativamente, analisando-se os índices fitossociológicos no ano *n* e analisando-se as diferenças em relação ao ano 1. No exemplo hipotético, pode-se concluir que houve inversão de flora devido a fatores de seleção, de tal forma que as espécies SP10, SP9, SP6 e SP5 ganharam importância (maior IR) em detrimento das espécies SP7, SP8, SP1 e SP2. Já as espécies SP3 e SP4 mantiveram as mesmas participações ao longo dos anos, mostrando que foram indiferentes às alterações impostas.

A



		DENSIDADE								MASSA SECA								ÍNDICES FITOSSOCIOLÓGICOS							
	ESPÉCIE	QUADRO AMOSTRAL						Total	Dei	QUADRO AMOSTRAL						Total	Doi	DeRi	Fri	FrRi	DoRi	Vci	VCRi	IVIi	IRi
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6			Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6			Fórmulas[1]							
																		(ni/N)*100	(UA/UA)x 100	(FUA/∑FA) x 100	(ABi/ABt) x 100	DeRi+DoRi	(VCi/VCt) x 100	DeR+FR+CoR	(IVI/IVt) x 100
5	SP1	3	2	5	6	1	2	19	3	15	10	25	30	5	10	95	15	19,59	100	15,79	19,39	38,98	19,49	54,76	18,25
6	SP2	1	4	3	6	3	1	18	3	5	20	15	30	15	5	90	15	18,56	100	15,79	18,37	36,92	18,46	52,71	17,57
7	SP3	1		2		1		4	1	5		10		5		20	3	4,12	50	7,89	4,09	8,21	4,10	16,10	5,37
8	SP4	2	1		2		1	6	1	10	10		10		5	35	5	6,19	67	10,53	7,14	13,33	6,66	23,85	7,95
9	SP5	1				1		2	0	5				5		10	2	2,06	33	5,26	2,04	4,10	2,05	9,37	3,12
10	SP6			1				1	0			5				5	1	1,62	17	2,63	1,02	2,05	1,03	4,68	1,56
11	SP7	3	4	3	6	2	4	22	4	15	20	15	30	10	20	110	18	22,68	100	15,79	22,45	45,13	22,56	60,92	20,31
12	SP8	3	3	2	5	3	4	20	3	15	15	10	25	15	20	100	17	20,62	100	15,79	20,41	41,03	20,51	56,82	18,94
13	SP9		2	1		1		4	1		10	5		5		20	3	4,12	50	7,89	4,09	8,21	4,10	16,10	5,37
14	SP10		1					1	0		5					5	1	1,63	17	2,63	1,02	2,65	1,03	4,68	1,56
15																									
16	Soma							97,00	16,17							490	81,67		633			200		300	
17	* formulas apresentadas no tópico 2																								

B



		DENSIDADE								MASSA SECA								ÍNDICES FITOSSOCIOLÓGICOS							
	ESPÉCIE	QUADRO AMOSTRAL						Total	Dei	QUADRO AMOSTRAL						Total	Doi	DeRi	Fri	FrRi	DoRi	Vci	VCRi	IVIi	IRi
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6			Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6			Fórmulas[1]							
																		(ni/N)*100	(UA/UA)x 100	(FUA/∑FA) x 100	(ABi/ABt) x 100	DeRi+DoRi	(VCi/VCt) x 100	DeR+FR+CoR	(IVI/IVt) x 100
5	SP1						1	1	0			5				5	1	1,03	17	2,63	1,03	2,06	1,03	4,68	1,56
6	SP2		1			1		2	0	5			5			10	2	2,06	33	5,26	2,06	4,12	2,06	9,39	3,13
7	SP3	2	1		2		1	6	1	10	5		10		5	30	5	6,19	67	10,53	6,19	12,37	6,19	22,98	7,63
8	SP4	1		2		1		4	1	5		10		5		20	3	4,12	50	7,89	4,12	8,25	4,12	16,14	5,38
9	SP5	1	4	3	6	3	1	18	3	5	20	15	30	15	5	90	15	18,56	100	15,79	18,56	37,11	18,56	52,90	17,63
10	SP6	3	2	5	6	1	2	19	3	15	10	25	30	5	10	95	16	19,59	100	15,79	19,59	39,18	19,59	54,96	18,32
11	SP7		1					1	0		5					5	1	1,03	17	2,63	1,03	2,06	1,03	4,69	1,56
12	SP8		2	1		1		4	1		10	5		5		20	3	4,12	50	7,89	4,12	8,25	4,12	16,14	5,38
13	SP9	3	3	2	5	3	4	20	3	15	15	10	25	15	20	100	17	20,62	100	15,79	20,62	41,24	20,62	57,03	19,01
14	SP10	3	4	3	6	2	4	22	4	15	20	15	30	10	20	110	18	22,68	100	15,79	22,68	45,36	22,68	61,15	20,38
15																									
16	Soma							97,06	16,17							485,00	80,83		633			200		300	
17	* formulas apresentadas no tópico 2																								

Quadro 1 – Planilhas fitossociológicas com dados hipotéticos em dois momentos: ano 1 (A) e ano n (B), ilustrando cálculos dos índices fitossociológicos para caracterizar uma área quanto à composição de plantas e para avaliar a dinâmica populacional de comunidades de plantas daninhas (mudança de flora).

4.2 Índice de diversidade (Shannon-Wiener) e de equabilidade (Pielou)

Para melhor entendimento do cálculo e do significado dos índices de diversidade de Shannon-Wiener e de equabilidade (J) de Pielou, apresentamos este segundo exemplo hipotético, composto de duas áreas, com mesma densidade total e variação na proporção das espécies (Quadro 2). A área 1 ilustra um caso de maior índice de diversidade de Shannon-Wiener (2,30) pois apresenta equilíbrio perfeito na participação das espécies em relação à densidade, com índice de equabilidade de Pielou (J) igual a 1,0. Por outro lado, a área 2 também é diversificada, porém com índice de Shannon-Wiener menor, de 1,44, e certo desequilíbrio na participação das espécies quanto à densidade (J = 0,66).

Espécies	Área 1			Área 2		
SP1	De 5	pi =De.R 0,10 (10%)	pi * ln (pi) - 0,230	De 1	pi = De.R 0,02 (2%)	pi * ln (pi) - 0,078
SP2	5	0,10 (10%)	- 0,230	1	0,02 (2%)	- 0,078
SP3	5	0,10 (10%)	- 0,230	2	0,04 (4%)	- 0,129
SP4	5	0,10 (10%)	- 0,230	2	0,04 (4%)	- 0,129
SP5	5	0,10 (10%)	- 0,230	2	0,04 (4%)	- 0,129
SP6	5	0,10 (10%)	- 0,230	2	0,04 (4%)	- 0,129
SP7	5	0,10 (10%)	- 0,230	5	0,10 (10%)	- 0,23
SP8	5	0,10 (10%)	- 0,230	5	0,10 (10%)	- 0,23
SP9	5	0,10 (10%)	- 0,230	30	0,60 (60%)	- 0,306
SP10	5	0,10 (10%)	- 0,230	--	--	--
Total	50	1,00 (100%)		50	1,00 (100%)	

H' (área 1) = $- \sum_{i=1}^{s} pi$ .ln *(pi)*	2,30	H' (área 2) = $- \sum_{i=1}^{s} pi$ .ln *(pi)*	1,44
H'max (área 1) = ln(S)	2,30	H'max (área 1) = ln(S)	2,18
J (área 1) = H' (área 1) / Hmax (área 1)	1,0	J (área 1) = H' (área 1) / Hmax (área 1)	0,66

S – Número de espécies amostradas

Quadro 2 – Planilha de cálculos do índice de diversidade de Whannon-Wiener (H') e de equabilidade de Pielou (J) a partir de dados hipotéticos em duas áreas.

4.3 Índices de similaridade de Jaccart (Sj) e Sorensen (Ss)

Neste terceiro exemplo, apresentamos 4 áreas com as respetivas composições específicas (Quadro 3). Para ilustrar os cálculos e as variações dos índices de Jaccart (Sj) e Sorensen (Ss), estabelecemos os seguintes contrastes: Área 1 x Área 2 (similaridade total); Área 1 x Área 3 (similaridade parcial) e Área 1 x Área 4 (similaridade nula). Os resultados destes contrastes são apresentados no Quadro 4.

Espécies	Densidade (planta/m2)			
	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4
SP1	3	9		
SP2	5	8		
SP3	2	6	3	
SP4	3	7	4	
SP5			5	2
SP6			5	3
SP7				4
SP8				5

Quadro 3 – Dados hipotéticos de composição específica, em densidade, quanto às áreas.

*Jaccart(Sj)**	*Área 1 x Area 2*	$Sj = \frac{a}{(a+b+c)}$	$Sj = \frac{4}{4+0+0}$	Sj = 1,0
	Área 1 x Area 3		$Sj = \frac{2}{2+2+2}$	Sj = 0,33
	Área 1 x Area 4		$Sj = \frac{0}{0+4+4}$	Sj = 0,0
*Sorensen(Ss)**	*Área 1 x Area 2*	$Ss = \frac{2a}{(2a+b+c)}$	$Ss = \frac{2 \times 4}{2 \times 4+(0+0)}$	Ss = 1,0
	Área 1 x Area 3		$Ss = \frac{2 \times 2}{2 \times 2+(2+2)}$	$Ss = 0,5$
	Área 1 x Area 4		$Ss = \frac{0}{4 \times 0+(0+0)}$	$Ss = 0,0$

* fórmulas apresentadas no tópico 2

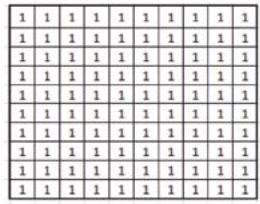
Quadro 4 – Sumarização de contrastes entre áreas, ilustrando os cálculos e a variação dos índices de similaridade de Jaccart (Sj) e Sorensen (Ss).

4.4 Índice agregação de Morisita (Id)

O quarto e último exemplo ilustra o índice de agregação de Morisita (Id) e sua relação com os padrões de distribuição de populações. São apresentados dados

hipotéticos de levantamento populacional de uma determinada espécie, em quatro áreas amostradas por meio de parcelas contíguas e contendo número fixo de 100 indivíduos. O caso 1 representa o extremo inferior (perfeitamente uniforme), onde o número de indivíduos por parcela amostral é constante e igual à unidade, típico de populações implantadas pelo homem, com espaçamentos definidos e densidade fixa de semeadura (Id = 0). O outro extremo, o caso 4, representa uma população com agregação máxima, típico de populações de plantas daninhas ou resistentes, no início do processo de seleção ou em processo de introdução em áreas novas (Id = 100). Já os casos 2 e 3 representam situações intermediárias. O caso 2 (Id = 8,28) representa distribuição agregada com tendência de aproximação à distribuição aleatória e o caso 3 representa distribuição uniforme (Id = 0,65) com tendência de aproximação à distribuição aleatória, lembrando que, na distribuição aleatória, Id = 1.

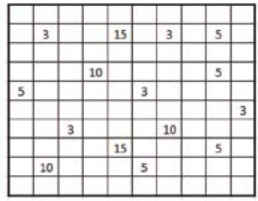
CASO 1



De (pl/parcela)	Frequência (F)	xi^2	$\sum F*xi^2$
1	100	$1^2 = 1$	100

Id = $n*\sum xi^2$ - N / N*(N-1)
Id = 100*(100 - 100) / (100*99)
Id = 0 (perfeitamente uniforme)

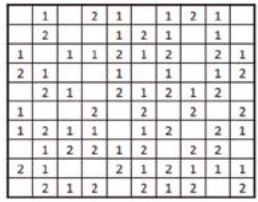
CASO 2



De (pl/parcela)	Frequência (F)	xi^2	$F*xi^2$
0	85	$0^2 = 0$	0
3	5	$3^2 = 9$	45
5	5	$5^2 = 25$	125
10	3	$10^2 = 100$	300
15	2	$15^2 = 225$	450
			$\sum F*xi^2 = 920$

Id = $n*\sum xi^2$ - N / N*(N-1) **Id = 8,28 (agregado)**
Id = 100*(920 - 100) / (100*99)

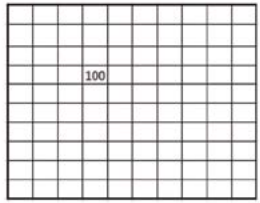
CASO 3



De (pl / parcela)	Frequência (F)	xi^2	$F*xi^2$
0	33	$0^2 = 0$	0
1	33	$1^2 = 1$	33
2	33	$2^2 = 4$	132
			$\sum F*xi^2 = 165$

Id = $n*\sum xi^2$ - N / N*(N-1) **Id = 0,65 (uniforme)**
Id = 100*(165 - 100) / (100*99)

CASO 4



De (pl / parcela)	Frequência (F)	xi^2	$\sum F*xi^2$
100	1	$100^2 = 10000$	10000

Id = $n*\sum xi^2$ - N / N*(N-1)
Id = 100*(10000 - 100) / (100*99)
Id = 100 (agregação máxima)

Quadro 5 – Esquema hipotético de 4 casos de levantamento de densidade de plantas no esquema de parcelas contíguas e sequência de cálculos para a determinação do índice de agregação de Morisita (Id). Os valores internos das parcelas representam o número de indivíduos detectados.

5 FITOSSOCIOLOGIA NO GERENCIAMENTO DE PROCESSSO DE CONTROLE DE PLANTAS DANINHAS

5.1 Gerenciamento de processos de controle de plantas daninhas pelo método PDCA

O gerenciamento do processo de controle de plantas daninhas é a busca pelo equilíbrio entre investimento (herbicidas, estrutura e mão de obra) e resultados (eficácia e seletividade), de modo que ocorra retorno econômico. Segundo Falconi (2013), os pontos fundamentais para o gerenciamento de qualquer processo são: (1) – Diagnósticos ou medições periódicas com obtenção de indicadores numéricos; (2) – Planejamento; (3) – Treinamento de equipes e execução do plano; (4) – Monitoramento de resultados, e (5) – Ações corretivas no planejamento em função dos resultados do monitoramento. Na Figura 5, consta um resumo do método PDCA (P = planejamento; D = treinamento e execução; C = monitoramento e A; ações corretivas) com destaque para o diagnóstico e os indicadores.

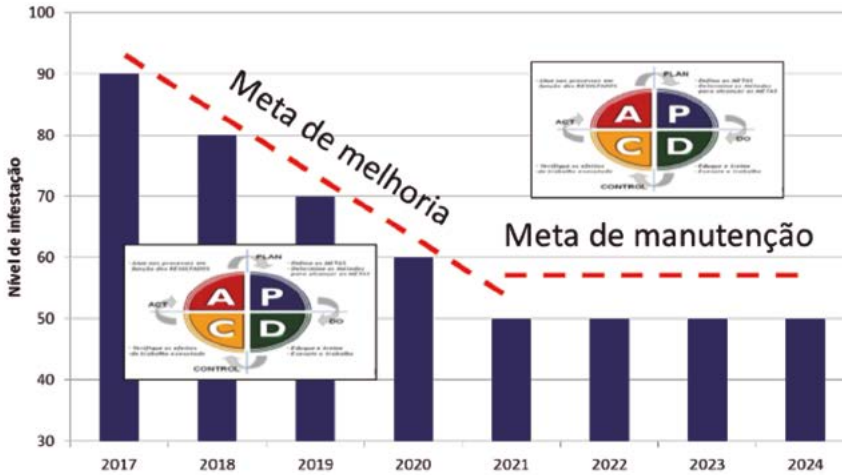


Figura 5 – Esquema de PDCA (P = planejamento; D = treinamento e execução; C = monitoramento e A; ações corretivas) de gerenciamento de processos. As barras

azuis representam os indicadores do processo ao longo do tempo, obtido por diagnósticos periódicos (anuais).

No que se refere a diagnósticos e indicadores, os índices fitossociológicos podem ser utilizados neste esquema de gerenciamento, desde que adaptado para conferir praticidade e agilidade no método de obtenção, mesmo que essas adaptações incorram em alguma redução nos níveis de confiabilidade, quando comparados aos exigidos pela pesquisa. Outra necessidade é a introdução de um fator de ponderação no cálculo dos índices que contemple a importância agronômica das espécies em relação à cultura. As espécies que mais interferem no desenvolvimento e na produtividade da cultura e na operacionalização de outros processos (controle de pragas, colheita, transporte), devem apresentar maior relevância no cálculo dos indicadores, assim como as espécies de maior dificuldade de controle, uma vez estabelecido (plantas perenes que exigem mão de obra e aplicação localizada de herbicida para o seu controle na cultura da cana, plantas resistentes a herbicidas em áreas de cereais, por exemplo).

Para que seja possível comparar diferentes unidades de produção, é necessário um método padrão que permita obter indicadores numéricos confiáveis que representem a situação da lavoura em relação às plantas daninhas. Ao empregar o mesmo método em diferentes propriedades, é possível obter modelos de manejo que tragam os melhores resultados (*benchmark*) para o processo de controle de plantas daninhas para, então, poder realizar comparações quanto à infestação e à eficácia dos programas adotados ao longo dos anos e medir impactos positivos ou negativos de decisões gerenciais; adoção de tecnologia, aumento e redução de investimento no processo com moléculas, estrutura e mão de obra; mudança de equipes; ritmo de reformas, rotação de culturas, entre outras.

5.2 O exemplo na cultura da cana-de-açúcar

Nos últimos cinco anos, há uma iniciativa da Herbae Consultoria e Projetos Agrícolas Ltda. e do grupo de pesquisa LAPDA (FCAV/Unesp, Câmpus de Jaboticabal) em definir alguns indicadores para o processo de controle de plantas daninhas

na cultura da cana-de-açúcar, bem como estabelecer um método para obtenção de tais indicadores. O método proposto nestes diagnósticos foi baseado em percorrida no campo e em experiências pessoais dos especialistas envolvidos, semelhante ao que ocorre até os dias de hoje para estimativa de produtividade de canavial. Os resultados obtidos passaram a influenciar nas estratégias e no planejamento deste importante processo, dentro dessas unidades. Uma limitação operacional na realização desses diagnósticos é que ainda está baseada na percorrida no campo e na vistoria de talhões por caminhamento, o que demanda tempo e mão de obra, cada vez mais escassos nas unidades de produção. O desenvolvimento de métodos utilizando imagens de satélites ou com câmeras multiespectrais e hiperespectrais acopladas a aeronaves não tripuladas (drones e vants) ou mesmo tripuladas (aviões e helicópteros) deverá ser um caminho natural para esta linha de pesquisa. O método proposto está baseado em quatro fases: (1) – Planejamento Amostral; (2) – Vistoria de campo e atribuição de notas; e (3) – Cálculo dos indicadores, e (4) – Geração de relatórios.

5.2.1 Planejamento amostral

Na fase de planejamento amostral, são definidos, no escritório e por pessoas não diretamente envolvidas no processo, blocos de produção (amostras) a serem vistoriados e avaliados na fase de campo, dentre aqueles previstos para serem colhidos na safra eminente em cada usina. Entenda-se, como amostra, um bloco a ser colhido na mesma época, a de tamanho entre 30 e 150 ha. Na elaboração e distribuição da amostragem, são considerados os seguintes critérios para balanceamento: cobertura geográfica, distribuição do perfil etário do canavial, ambientes de produção, épocas de corte previsto, dentre outros. O número de blocos de produção vistoriados varia entre 80 e 130, de acordo com a área total de colheita nas respectivas usinas e safras, e o levantamento limita-se ao máximo de 5 dias (10 horas) de trabalho no campo. Deve destacar-se que a amostragem proposta é do tipo não probabilística, ou seja, não são considerados os valores de probabilidade de inclusão para a seleção dos locais de amostragem. A categoria de amostragem utilizada é a "Conveniente" (ANJOS et al., 2020), que está diretamente relacionada à otimização do uso dos recursos disponíveis. Quanto menor forem os custos financeiro e opera-

cional, maior será o número de observações.

Uma vez elaborada a amostragem, ainda no escritório, são definidos os pontos de parada e de entrada no interior dos talhões para a avaliação da comunidade de plantas daninhas. O número de paradas e de entradas no interior do talhão é definido de acordo com o tamanho do bloco de produção: de 30 a 75 ha (dois pontos, quatro talhões) e de 76 a 150 ha (três pontos, seis talhões).

5.2.2 Vistoria de campo e atribuição de notas

No campo, o percurso no interior dos talhões é padronizado, adentrando-se até aproximadamente 50 metros e observando-se pelo menos, 10 entrelinhas diferentes. As plantas daninhas dos carreadores, margens de talhão e do interior dos talhões que puderam ser observadas durante o deslocamento de um ponto de parada para outro, também fazem parte da avaliação e são consideradas por ocasião da atribuição das notas. As Figuras 6A a 6D apresentam hipoteticamente a amostragem e a vistoria num bloco de produção (amostra).

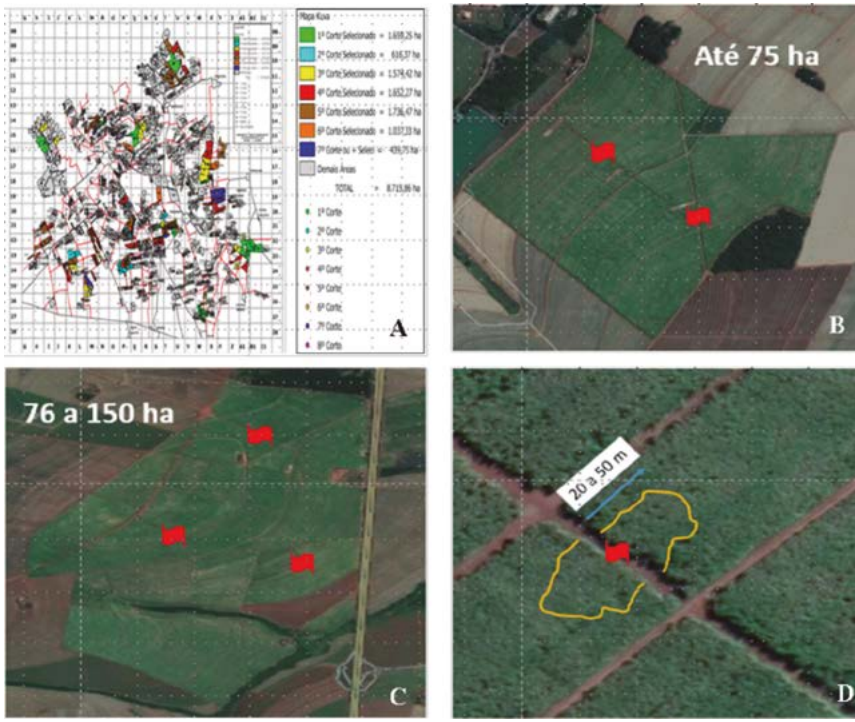


Figura 6 – Ilustração hipotética de um planejamento amostral de pontos de parada e rota de caminhamento no interior de talhões para avaliação de plantas daninhas e atribuição de notas. (A) – composição da amostragem; (B e C) pontos de parada em função do tamanho do bloco de produção, e (D) – rota mínima de caminhamento nos pontos de parada.

Ao final do percurso num bloco de produção (amostra), são atribuídas notas para os diferentes grupos estabelecidos: complexo das braquiárias perenes (BRASS), capim-colonião (PANMA), tiririca (CYPRO), grama-seda (CYNDA), complexo de capim-colchão (DIGSS), capim-marmelada (BRAPL), complexo de Ipomoeas (IPOSS), complexo de Merremias (MRRSS), fedegoso (CASOB), complexo de guanxumas (SIDSS), capim-carrapicho (CCHEC), complexo de carurus (AMASS), capim-pé-de-galinha (ELEIN), mamona (RIICO), mucuna-preta (MUCAT), capim-massambará (SORHA), capim-falso-massambará (SORAR) e capim-camalote (ROOEX); outras

plantas daninhas foram contempladas no somatório de outras folhas largas (OFL) e no somatório de outras folhas estreitas (OFE). A escala de notas utilizada e a descrição constam no Quadro 6. Vale destacar aqui que essas notas, de forma prática, representam o índice de valor cobertura (VC), que é a somatória da densidade com a dominância das espécies ou com o grupo de espécies.

O registro dos parâmetros avaliados, as notas para os grupos de espécies e informações adicionais, tais como: variedade, padrão de textura de solo, ambiente agrícola, coordenadas geográficas, idade de corte e fotografias, são realizados por meio de aplicativo TI - Agrícola para dispositivo móvel (telefones celulares ou tablet), ilustrado pela Figura 7.

Nota	Descrição
0	Nenhuma planta da espécie ou grupo
1	Poucas plantas da espécie ou do grupo (é possível quantificar numa vistoria rápida) e observadas em poucos talhões (frequência < 50%)
2	Poucas plantas da espécie ou do grupo (é possível quantificar numa vistoria rápida) em vários talhões (frequência > 50%)
3	Muitas plantas da espécie ou do grupo (não é possível quantificar numa vistoria rápida) em poucos talhões (frequência <50%)
4	Muitas plantas da espécie ou do grupo (não é possível quantificar numa vistoria rápida) em muitos talhões (frequência > 50%)
5	Muitas plantas da espécie ou do grupo (não é possível quantificar numa vistoria rápida) em todos os talhões (frequência = 100%)

Quadro 6: Escala de notas de infestação com as respectivas descrições

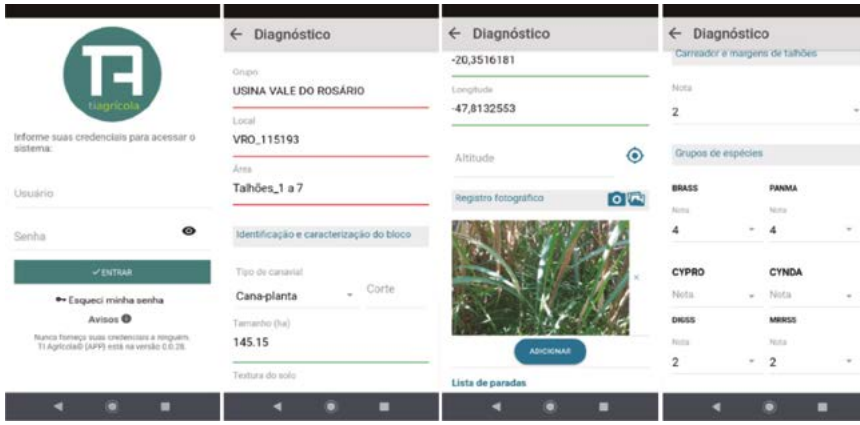


Figura 7 – Telas de aplicativo coletor de dados para fins de diagnóstico de plantas daninhas em canaviais, para o cálculo de indicadores adaptados da fitossociologia.

5.2.3 Cálculo dos indicadores

5.2.3.1 Índice de infestação geral

Para o cálculo do índice de infestação de plantas daninhas nos diferentes blocos de produção, sugere-se a seguinte fórmula ponderada:

$$I.INF\ (b) = 4\ x\ (Cp) + 3\ x\ (Cs) = 2\ x\ (Ct) + 1\ x\ (Cq)$$

Em que: *I.INF (b)* = índice de infestação do bloco de produção; *Cp* = categorias de peso quatro; PANMA, BRASS, CYNDA, MUCAT (Primários); *Cs* = categorias de peso três; RIICO, CYPRO, IPOSS, MRRSS, SORHA, SORAR, DIGSS, ROOEX (Secundários); *Ct* = categorias de peso dois; CASOB, outras FL, outras FE, carreadores e bordas de talhões + curvas em nível (Terciários); *Cq* = categorias de peso um; SIDSS, AMASS, CCHEC, ELEIN (Quaternários).

Os coeficientes de ponderação de 1 a 4, na fórmula do I.INF (b), consideram o impacto negativo da deficiência no controle das diferentes categorias de plantas daninhas ou de grupos de plantas daninhas, na produtividade, no rendimento da

operação de colheita, bem como os esforços e os investimentos necessários para a sua eliminação.

Para a obtenção do índice de infestação da usina, a fórmula proposta é:

$$I.INF\ (usina) = \frac{\sum I.INF\ (b)}{N}$$

Em que: I.INF (Usina) = Índice de infestação da usina; ∑ I.INF (b) = Somatório dos índices de infestação dos blocos de produção amostrados em determinado ano; N = número de blocos de produção amostrados.

5.2.3.2 Índice de infestação por categoria de corte

Os índices de infestação das usinas também podem ser calculados parcialmente (segmentado), de acordo com a categorização do canavial por idade, aplicando a fórmula do I.INF (usina) para cana-planta, cana-soca nova (2° e 3° corte) e cana-soca velha (≥ 4° corte):

Para cana-planta $$I.INF\ (usina)_cp = \frac{\sum I.INF\ (b)_cp}{N_cp}$$

Para cana-soca nova $$I.INF\ (usina)_cs_2{,}3 = \frac{\sum I.INF\ (b)_cs_2{,}3}{N_cs_2{,}3}$$

Para cana-soca velha $$I.INF\ (usina)_cs_ \geq 4 = \frac{\sum I.INF\ (b)_cs_\geq 4}{N_cs_\geq 4}$$

Em que: *I.INF (Usina)_cp* = Índice de infestação em cana-planta; *I.INF (Usina)_cp_2,3* = Índice de infestação em cana-soca de 2° e 3° cortes; *I.INF (Usina)_cp_≥4* = Índice de infestação em cana-soca de 4° corte em diante; *∑ I.INF (b)_cp* = Somatório dos índices de infestação dos blocos de cana-planta; *∑ I.INF (b)_cs_2,3* = Somatório dos índices de infestação dos blocos de cana-soca de 2° e 3° cortes; *∑ I.INF (b)_cs_≥4* = Somatório dos índices de infestação dos blocos de cana-soca de 4° corte em diante; *N_cp* = número de blocos de cana-planta amostrados; *N_cs_2,3* = número

de blocos de cana-soca de 2° e 3° cortes amostrados;*N_cs_≥4* = número de blocos de cana-soca de 4° corte em diante, amostrados

Para avaliar a participação das espécies ou grupo de espécies, independentemente do grau de importância agronômica, podem ser calculados índices fitossociológicos baseados na frequência e nas notas atribuídas (escala de 0 a 5), pois essas notas, de certa forma, refletem o valor de cobertura proporcionada pelas espécies ou grupo de espécies nos canaviais, na região amostrada, que por sua vez é derivada de densidade e da massa das plantas (dominância). Esses índices foram calculados seguindo uma sequência de cálculos.

5.2.3.3 Frequência (F) e Frequência relativa (Fr)

$$F_sp1 = \frac{(N_sp1\ x\ 100)}{Nt}$$

Em que: *F_sp1* = frequência da espécie ou grupo de espécie 1; *N_sp1* = número de blocos de produção onde ocorreu a espécie ou grupo de espécie 1; *Nt* = número total de blocos de produção amostrados

$$Fr_sp1 = \frac{(F_sp1\ x\ 100)}{\sum Ft}$$

Em que: *Fr_sp1* = Frequência relativa da espécie ou grupo de espécie 1; *∑Ft* = Somatório da frequência de todas as espécies ou grupo de espécies observadas na avaliação.

5.2.3.4 Valor de cobertura (VC) e Valor de cobertura relativo (VCR)

$$VC_sp1 = \frac{\sum n_sp1}{Nt}$$

Em que: *VC_sp1* = valor de cobertura da espécie ou grupo de espécie 1; *∑Mn_sp1* = soma das notas atribuídas para a espécie ou grupo de espécie 1 em toda

a amostragem; *Nt* = número total de blocos de produção amostrados.

$$VCr_sp1 = \frac{Mn_sp1\ x\ 100}{\sum Mn_t}$$

Em que: *VCr_sp1* = valor de cobertura relativo da espécie ou grupo de espécie 1; *Mn_sp1* = média das notas atribuídas para a espécie ou grupo de espécie 1 em toda a amostragem; ∑*Mn_t* = Somatório da média das notas de todas as espécies ou grupo de espécies observadas em toda a amostragem.

5.2.3.5 Índice de valor de importância (IVI) e Importância relativa (I.R)

$$IVI_sp1 = Fr_sp1 + VCr_sp1$$

Em que: *IVI-sp1* = índice de valor de importância da espécie ou grupo de espécie 1; *Fr_sp1* = Frequência relativa da espécie ou grupo de espécie 1; *VCr_sp1* = Valor de cobertura relativo da espécie ou grupo de espécie 1

$$I.R_sp1 = \frac{IVI_sp1}{\sum IVI_t}$$

Em que: *IR_sp1* = Importância relativa das espécies ou grupo de espécie 1; *IVI_sp1* = Índice de valor de importância da espécie ou grupo de espécie 1; ∑*IVI_t* = Somatória do índice de valor de importância de todas as espécies ou grupo de espécie 1.

5.2.3.6 Participação das espécies ou grupo de espécies no Índice de infestação

A participação das diferentes espécies ou grupo de espécies nos índices, contemplando a importância agronômica (pesos de 1 a 4), também pode ser calculada. Para isso, igualaram-se a zero as notas da espécie de interesse em todos os blocos de produção avaliados. Por meio da subtração entre o I.INF (usina) com todos os dados coletado e o I.INF (usina), com dados zerados para o grupo de interesse, a participação dos principais grupos foi calculada. Esse valor obtido para os diferentes

grupos representa a participação na usina, considerando o valor de cobertura (densidade e biomassa), frequência e importância agronômica.

$$I.P_sp1 = I.INF_t - I.INF_z_sp1$$

Em que: *I.P_sp1* = índice de participação da espécie 1; *I.INF_t* = índice de infestação com os dados de todas as espécies; *I.INF_z_sp1*= índice de infestação com dados zerados para a espécie 1.

5.2.4 Relatórios gerenciais

5.2.4.1 Resultados momentâneos de usinas individuais

Os gráficos da Figura 8 apresentam resultado de duas usinas em situações extremas: a primeira (gráfico superior) com alta infestação de plantas daninhas (I.INF geral = 48,7), e a segunda (gráfico inferior) com baixa infestação de plantas daninhas (I.INF geral = 5,63). Com a utilização de índices adaptados a partir da fitossociologia, é possível estabelecer e padronizar uma forma de medir a situação de infestação de plantas daninhas que o setor de tratos culturais está entregando para os processos seguintes, a colheita, o transporte e a indústria. A régua contida na figura representa simbolicamente um método e uma unidade de medida para os resultados obtidos pelas diferentes estratégias de manejo de plantas daninhas em usinas.

Na Figura 9, os índices de infestação são apresentados de forma segmentada em cana-planta, soca de 2º e 3º cortes e cana-soca a partir do 4º corte. Essa segmentação é importante, pois possibilita uma análise da evolução no grau de infestação ao longo dos cortes economicamente viáveis. Permite, ainda, ao longo do tempo, medir a influência das estratégias adotadas nos diferentes segmentos, pois a cana-planta será soca 2; soca 3 será soca 4, e parte da soca maior ou igual a 4 será cana-planta no ano seguinte. Sendo assim, uma melhora ou piora na performance em determinada categoria de corte reflete no resultado do ano corrente, na própria categoria, mas também em categorias subsequentes ao longo dos anos, principalmente em relação às espécies de plantas daninhas de ciclo perene. Esses índices apresentados refletem

resultados do manejo do ano anterior, mas também dos anos anteriores, uma vez que algumas plantas daninhas se perenizam na lavoura, e plantas anuais acumulam mais sementes no solo quanto maiores forem os níveis de escape às estratégias de controle adotados nos últimos 5 a 6 anos (ciclo médio do total de cortes).

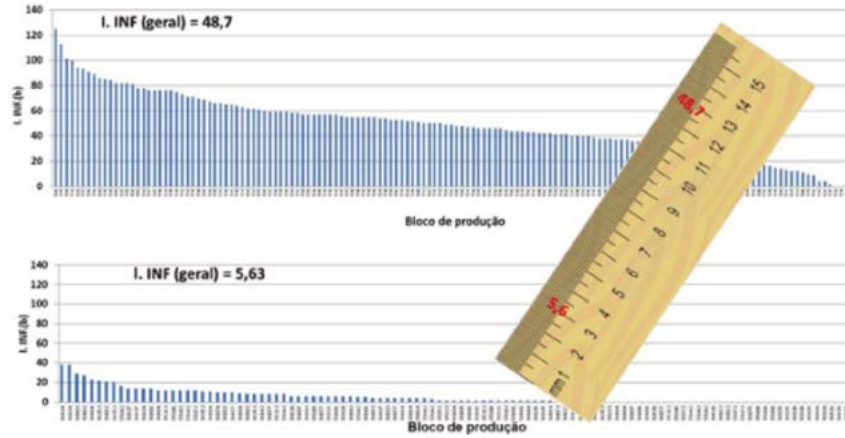


Figura 8 – Resultados de levantamento de plantas daninhas antecedendo o início de safra, em duas usinas, uma com elevado índice de infestação (48,7) e outra com baixo índice de infestação (5,63).

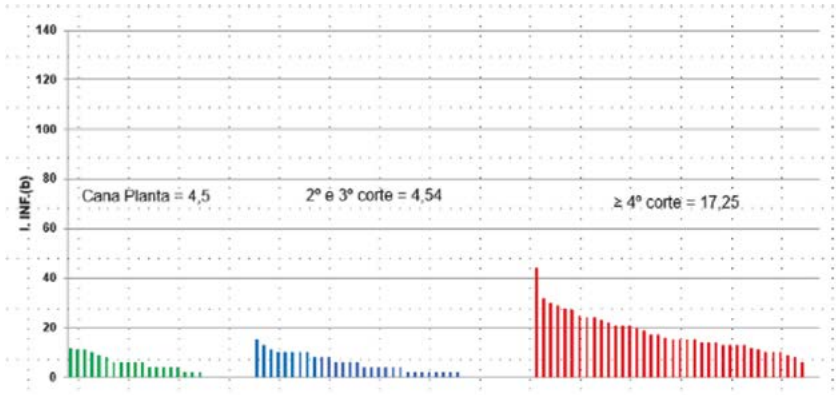


Figura 9 – Resultados de levantamento de plantas daninhas em uma usina de açúcar e álcool antecedendo o início de safra, com índices de infestação segmentados por idade de corte (cana-planta, cana-soca de 2º e 3º cortes e cana-soca de 4º corte em diante).

Os índices fitossociológicos adaptados para o diagnóstico de plantas daninhas também são úteis para caracterizar a organização e a composição da comunidade de plantas, neste caso, das plantas daninhas de canaviais. Nesta pesquisa, a importância relativa (IR) de uma espécie ou conjunto de espécies é dada pela composição de dois índices, frequência relativa (Fr) e o valor de cobertura relativo (VCr), que por sua vez é composto pela Densidade Relativa (DeR) e Dominância Relativa (DoR). O primeiro fator é o número de amostras em que foi detectada a presença de uma espécie ou grupo de espécies em relação ao total de amostras, e o segundo fator representa a percepção visual de cobertura (atribuição de nota da escala). Esses índices servem para indicar quais as principais espécies ou grupo de espécies e suas respectivas participações no momento das vistorias de campo e quando determinadas periodicamente permitem avaliar alterações na composição devido a modificações no sistema produtivo; porém, não contemplam a importância agronômica. São úteis também no momento do planejamento de compras de herbicidas, pois amplo espectro de plantas com relevância econômica requer maior diversidade de moléculas para manejá-las, ao passo que espectro mais estreito de plantas poucas moléculas podem ser suficientes.

O gráfico da Figura 10 fornece uma ordenação decrescente de plantas, de acordo com a participação nos canaviais amostrados. No entanto, nessa ordenação, não está contemplada a importância agronômica, que é representada pelos pesos de 1 a 4 na fórmula do Índice de Infestação (I.INF). Já na Figura 11, é apresentado um gráfico com uma ordenação quanto à participação das diferentes categorias na formação do I.INF, que leva em conta a frequência, o valor de cobertura (densidade + dominância) e a relevância agronômica. Este índice dá o indicativo de quais categorias devem ter atenção especial num programa de manejo para reduzir os índices de infestação nos anos seguintes. Na Figura 9, o I.INF é igual a 18,72, e as categorias que mais contribuem na formação são: capim-colonião (PANMA), carreadores, outras folhas largas (OFL), mamona (RIICO) e grama-seda (CYNDA), com 4,51; 4,18; 2,94 e 2,09.

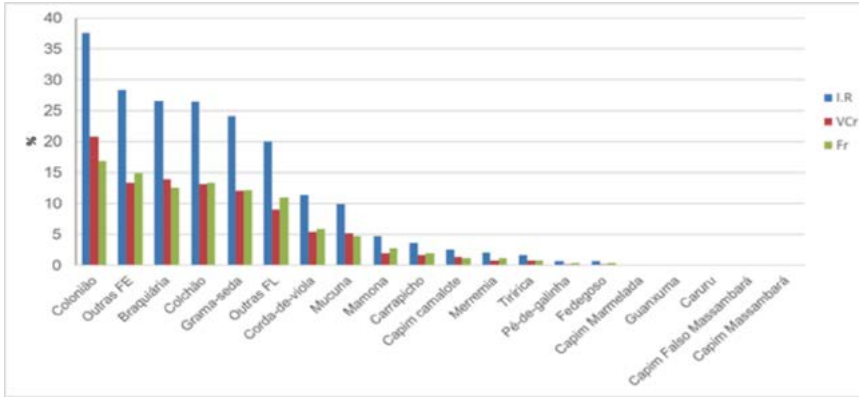


Figura 10 – Índices fitossociológicos (Importância relativa – I.R; Valor de cobertura relativo - VCr e Frequência relativa – Fr) da comunidade infestante de plantas daninhas, numa usina de açúcar e álcool.

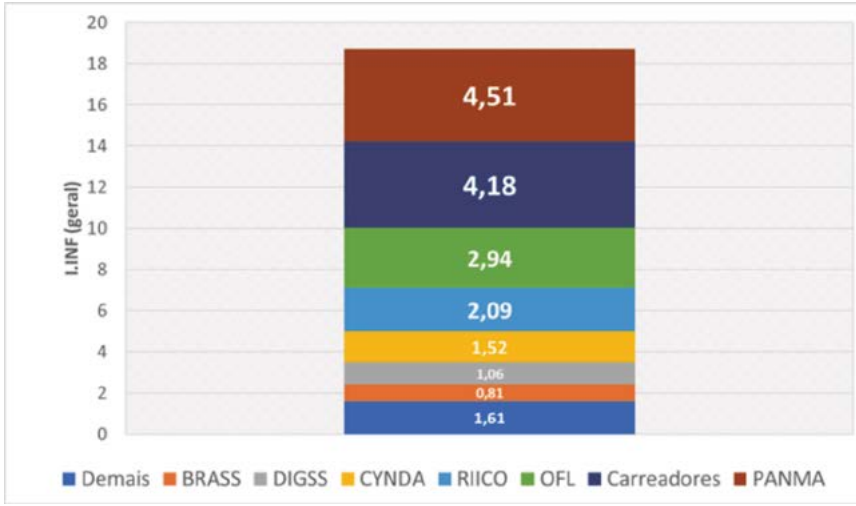


Figura 11 – Participação das diferentes categorias na formação do índice de infestação geral de plantas daninhas em uma usina de açúcar e álcool.

5.2.4.2 Resultados momentâneos de várias usinas

Como os levantamentos de campo são realizados com o mesmo método e numa época padrão em todas as usinas (propriedades), neste caso, nas primeiras semanas que antecedem o início de safra, é possível utilizar os índices para comparar unidades. Ao fazermos comparações, estamos buscando um modelo (benchmark) a ser atingido em relação a um programa de controle de plantas daninhas. Porém, outros componentes devem ser avaliados, tais como: região onde está inserida a propriedade, composição dos ambientes de produção e custo dos programas de manejo adotados. O objetivo é ter, ao longo do tempo, benchmarks regionalizados e baseados em eficácia de controle e seletividade para a cultura, a um custo razoável, e que traga o melhor retorno econômico. Na Figura 12, são apresentados resultados de 28 usinas amostradas em 2019 com amplitude de 15,78 para o I.INF (de 2,94 a 18,72).

Essa mesma comparação pode ser feita para a participação das espécies de plantas daninhas em diferentes usinas, quanto ao valor de cobertura, representado pela média das notas atribuídas (0 a 5) e a frequência. Para exemplificação, na Figura 11, são apresentados resultados para dois grupos de plantas daninhas, complexo das braquiárias (BRASS), capim-colonião (PANMA) e grama-seda (CYNDA). No conjunto das usinas amostradas, as maiores grandezas ocorrem para BRASS, ao passo que, para CYNDA, os números ainda são menores. Ainda, dentro dessas duas espécies, há grande amplitude dos dados, indicando que as usinas não são uniformes quanto ao perfil de infestação.

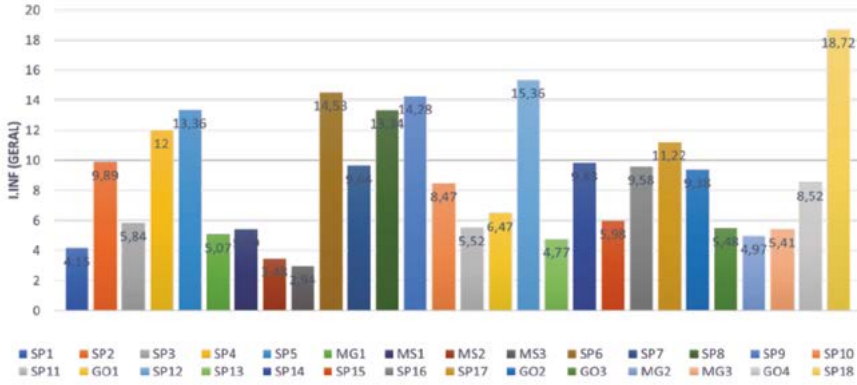


Figura 12 – Índices de infestação geral de 28 usinas de açúcar e álcool de diferentes estados, amostradas na pré-colheita de 2019.

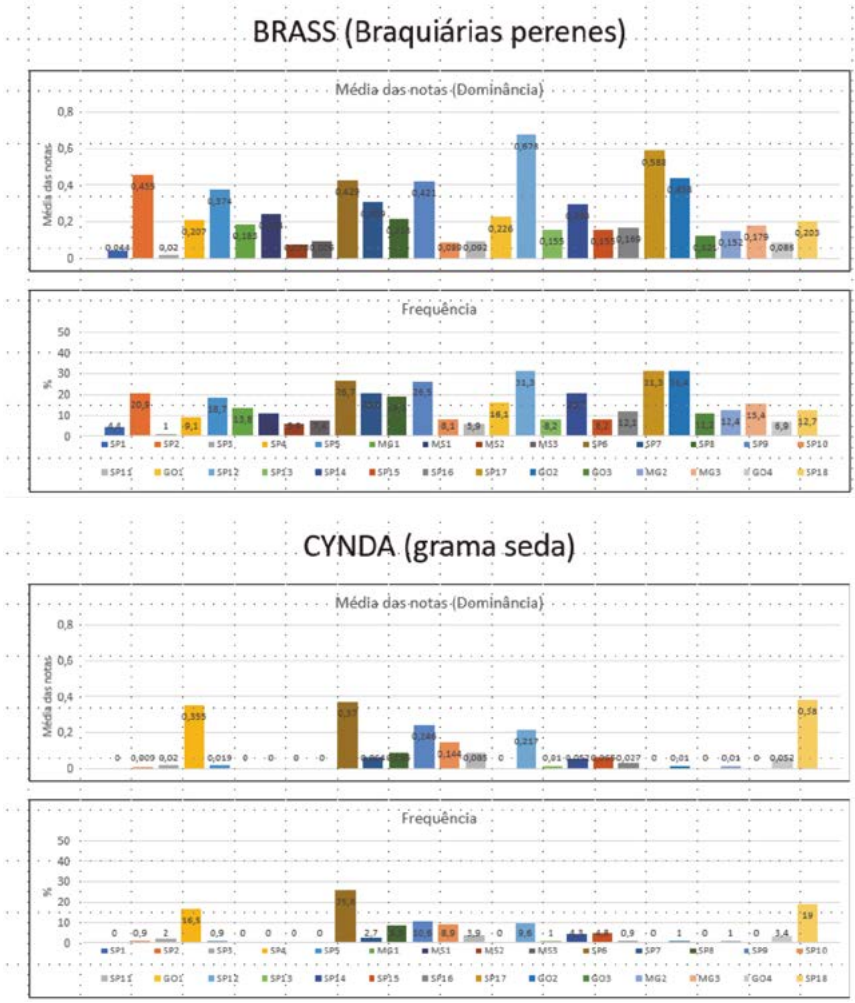


Figura 13: Média das notas (valor de cobertura) e frequência de duas categorias (espécies) de plantas daninhas, em 28 usinas diagnosticadas na pré-colheita da safra de 2019.

5.2.4.3 Resultados de várias usinas ao longo do tempo

Quando o diagnóstico é realizado periodicamente, permite avaliar as evoluções de diferentes usinas quanto aos resultados de controle de plantas daninhas, conforme ilustrado na Figura 14. Nela, são apresentados resultados de I.INF de nove usinas, em quatro anos consecutivos. É possível observar diferentes tendências: aumento, redução e estabilização dos índices de infestação. Essas variações nos índices podem ser explicadas por motivos climáticos ou gerenciais; aumento ou redução de investimento no processo (herbicida, estrutura e mão de obra), aumento ou redução no ritmo de reforma; desempenho e troca de equipes; contratação de consultorias; mudança em outros processos que interagem com o controle de plantas daninhas (preparo do solo, por exemplo); aquisição e devolução de áreas, etc. De posse destes índices, ao longo do tempo é possível medir o impacto dessas decisões gerenciais citadas e se foram assertivas ou equivocadas quanto ao controle de mato.

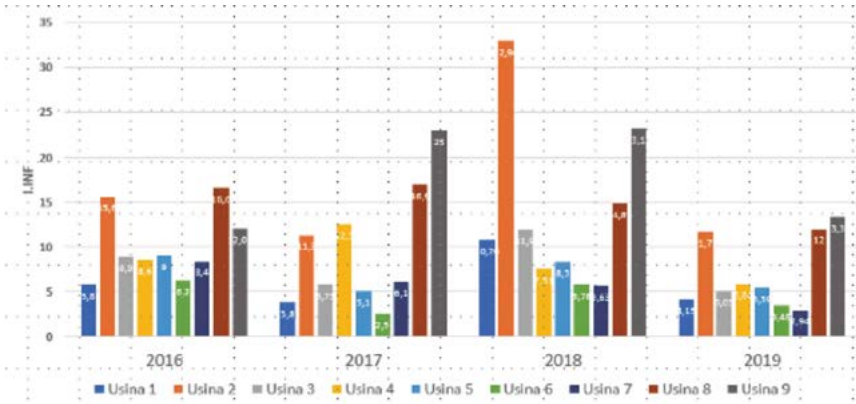


Figura 14. Índice de infestação de plantas daninhas em canaviais obtidos em nove usinas, por quatro anos consecutivos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A fitossociologia e seus índices surgiram da necessidade de se complementar os estudos realizados pelos botânicos quanto à identificação e classificação das

espécies vegetais, pelos fisiologistas vegetais quanto às estruturas e funções vitais da planta e pelos ecólogos para entender o comportamento de populações e comunidades. Inicialmente, dedicaram-se à atribuição de índices numéricos para caracterizar a composição, densidade, cobertura, distribuição e diversidade de ecossistemas naturais. Com o decorrer do tempo, passaram a integrar estudos de ambientes antrópicos, dentre os quais a agricultura, pecuária e silvicultura, principalmente com foco em plantas daninhas (matologia).

Na matologia, no que tange à pesquisa, foi e tem sido amplamente aplicada em estudos de caracterização de flora de plantas daninhas, associada a determinada região, cultura ou sistema de produção. Quando empregado numa mesma área com certa periodicidade, auxilia no conhecimento da dinâmica da comunidade e das populações de espécies de plantas daninhas perante adoção de novas técnicas de controle, sistemas de produção e esquema de rotação de culturas.

A utilização dos índices fitossociológicos pode extrapolar os limites da pesquisa e passar a serem utilizados como indicadores para gestão do processo de controle de plantas daninhas, nas diversas culturas agrícolas. Pois, por meio desses indicadores, pode-se acompanhar a evolução de resultados, que podem ser positivos ou negativos, medir o impacto do aumento ou da redução de investimento no processo (herbicidas, estrutura e mão de obra), mudança nas equipes operacionais ou alteração em outros processos que afetam o controle de plantas daninhas (ex: preparo do solo, sistema de colheita e esquema de rotação de culturas). Para que isso ocorra, é preciso dar praticidade ao método de amostragem e avaliação das plantas no campo, mantendo um nível mínimo de confiabilidade, que pode ser menor do que aqueles exigidos pela pesquisa. Neste sentido, a adoção de amostragem não probabilística por conveniência e a substituição de contagens e a coleta de plantas para obtenção de massa seca, são algumas das simplificações possíveis.

Com o desenvolvimento da agricultura digital e das plataformas que hospedam informações de solo, clima, telemetria, além de imagens de satélites e imagens de altíssima resolução, capturadas por câmeras multiespectrais, hiperespectrais e de calor, acoplados a aeronaves tripuladas e não tripuladas (drones e asa-fixa), é uma tendência natural que os levantamentos fitossociológicos possam ser efetuados no futuro com essas tecnologias e equipamentos. Porém, como os algoritmos ainda estão todos em fase de treinamento e com precisão duvidosa, esses levantamentos

ainda não apresentam escala comercial. É fundamental, nesta fase, a participação de profissionais da agricultura que atuam no campo para vistoriar, apontar os acertos e corrigir as falhas de reconhecimento e, assim, retroalimentar o banco de dados até que os níveis de acerto e detalhes atinjam níveis suficientes para a tomada de decisão dos agricultores e técnicos ao nível operacional ou gerencial. Não há dúvidas de que esse grau de assertividade chegará ao campo, restando saber quanto tempo será necessário para isso.

REFERÊNCIAS

ADEGAS, F. S. et al. Levantamento fitossociológico de plantas daninhas na cultura do girassol. **Planta Daninha**, v. 28. n. 4, p. 705-716, 2010.

ALVES, P. L. C. A. et al. Comunidade de plantas daninhas e resistência a glifosato. In: BERGER, G. U.; FAVORETTO, L. R. G. **Monitoramento Ambiental Soja Roundup Ready**. Botucatu: FEPAF, 2014. p. 625-661.

ARAUJO, V. G.; ACCIOLY, P. Uso de sensoriamento remoto na estimativa de densidade de povoamentos florestais. **Brazilian Journal of Technology**, v. 2, n. 3, p. 758-783, abr./ jun. 2019.

BENOIT, D. L.; DARKSEN, D. A.; PANNETON, B. Innovative approaches to seedbank studies. **Weed Science**, v.40, p. 660-669, 1992.

BOSAK, K. Secrets of UAV photomapping. 2009. Disponível em: <http://ww38.aerialrobotics.eu/pteryx/pteryx-mapping-secrets.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2020.

ANJOS, L.; VASQUES, G.; HEUVELINK, G. **Capítulo 9 – Amostragem não – probabilística**. 2020. Disponível em: <https://samuel-rosa.github.io/pedometria-feita-simples/amostragem-probabilistica.html>. Acesso em: 04 abr. 2020.

FITOSSOCIOLOGIA E DIVERSIDADE. 2020. Disponível em: <http://www.conhe-

cer.org.br/download/inventario/Modulo%20V%20-%20Fitossociologia%20e%20Diversidade.pdf>. Acesso em: 04 abr. 2020.

BLOG DO MATA NATIVA. I**nventário Florestal – Levantamento fitossociológico – quais informações obter**. 2020. Disponível em: <http://www.matanativa.com.br/blog/levantamento-fitossociologico/>. Acesso em: 04 abr. 2020.

FARIA, P. C. L. **Padrão espacial de populações**. 2020. Disponível em: http://paginapessoal.rtfpr.edu.br/patricialobo/ecossistemas/apostila_padrao_espacial.pdf/at_download/file. Acesso em: 04 de abril de 2020.

BRIGHENTI, A. M. et al. Cadastramento fitossociológico de plantas daninhas na cultura do girassol. **Pesq. Agropec. Bras**., v. 38, p. 651-657, mai. 2003.

BROWER, J. E.; ZAR, J. H. **Field & laboratory methods for general ecology.** 2 ed. Iowa: Wm. C. Brown Publishers, 1984.

CAPORAL, F. J. M.; BOLDRINI, I. I. Florística e fitossociologia de um campo manejado na serra do sudeste, Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 5, n. 2-3, p. 37-44, 2007.

CARDINA, J.; JOHNSON, G. A.; SPARROW, D. H. The nature and consequence of weed spatial distribution. **Weed Science**, v.45, p. 364-373, 1997.

CARDINA, J.; SPARROW, D. H.; McCOY, E. L. Spatial relationships between seedbank and seedlings populations of common lambsquarters (*Chenopodium album*) and annual grasses. **Weed Science**, v.44, p. 298-308, 1996.

CHAVES, A. D. C. G. et al. A importância dos levantamentos florístico e fitossociológico para a conservação e preservação das florestas. **Revista ACSA**, v. 9, n. 2, p. 42-48, 2013.

ERASMO, E. A. L.; PINHEIRO, L. L. A.; COSTA, N. V. Levantamento fitossociológico

das comunidades de plantas infestantes em áreas de produção de arroz irrigado cultivado sob diferentes sistemas de manejo. **Planta Daninha**, v. 22, n. 2, p. 195-201, 2004.

ESQUERDO, J. C. D .M. **Adaptação de um pulverizador convencional para aplicação localizada de defensivos agrícolas**. 2002. 113 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2002.

FALCONI, V. **Gerenciamento da rotina do trabalho do dia a dia**. 9 ed. Nova Lima: Falconi Editora, 2013.

FELFILI, J. M.; VENTUROLI, F. **Tópicos em análise de vegetação**. 1 ed. Brasília: Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, 2000.
FERNÁNDEZ-QUINTANILLA, C. et al. Ecologia de lãs malas hierbas. In GARCIA TORRES, L.; FERNÁNDEZ-QUINTANILLA, C. **Fundamentos sobre malas hierbas y herbicidas**. Madrid: Mundi-Prensa, 1991. p. 49-69.

FERREIRA, R. V. et al. Organização das comunidades infestantes de plantas daninhas na cultura da cana-de-açúcar em agrupamentos-padrão. **Planta Daninha**, v. 29, p. 363-371, 2011.

FREITAS, W. K.; MAGALHÃES, L. M. S. Métodos e parâmetros para estudo da vegetação com ênfase no estrato arbóreo. **Floran - Floresta e Ambiente**, v. 14, n. 4, p. 520-540, 2012.

GODOY, G.; VEGA, J.; PITTY, A. El tipo de labranza afecta la flora y la distribución vertical del banco de semillas de malezas. **Ceiba**, v. 36, n. 2, p. 217-229, 1995.

GOMES, G. L. G. C. et al. Cadastramento fitossociológico de plantas daninhas na bananicultura. **Planta Daninha**, v. 28, n. 1, p. 61-68, 2010.

INOUE, M. H. et al. Levantamento fitossociológico em pastagens. **Planta Daninha**,

v.30, n. 1, p. 55-63, 2012.

JEKELAITIS, A. et al. Dinâmica populacional de plantas daninhas sob diferentes sistemas de manejos nas culturas de milho e feijão. **Planta Daninha**, v.21, n.1, p.71-79, 2003.

JOHNSON, G. A.; MORTENSEN, D. A.; GOTWAY, C. A. Spatial and temporal analysis of weed seedling populations using geoestatistics. **Weed Science**, v.44, p. 704-710, 1996.

KUVA, M. A. et al. Fitossociologia de comunidades de plantas daninhas em agroecossistemas de cana crua. **Planta Daninha**, v. 25, p. 501-511, 2007.

KUVA, M. A. et al. Padrões de infestação de comunidades de plantas daninhas no agroecosssistema de cana-crua. **Planta Daninha**, v. 26, n. 3, p. 549-557, 2008.

LARA, J. F. R.; MACEDO, J. F.; BRANDÃO, M. Plantas daninhas em pastagens de várzeas no estado de Minas Gerais. **Planta Daninha**, v. 21, n. 1, p. 11-20, 2003.

MACEDO, J. F.; BRANDÃO, M.; LARA, J. F. R. Plantas daninhas na pós-colheita de milho nas várzeas do rio São Francisco, em Minas Gerais. Planta **Daninha**, v. 21, n. 2, p. 239-248, 2003.

MAGURRAN, A. E. **Diversidade ecológica e sua mensuração nt.** Universidade de Princeton Press, Nova Jersey, 179 pp., 1988.

MANTOVANI, A. et al. **Inventário e manejo florestal. Amostragem, caracterização de estádios sucessionais na vegetação catarinense e manejo de palmiteiros (*Euterpe edulis*) em regime de rendimento sustentável**. Florianópolis: Núcleo de Pesquisas em Florestas Tropicais – NPFT; 2005.

MARTINS, F. R. Fitossociologia de florestas no Brasil: um histórico bibliográfico. **Pesquisas – série Botânica**, n. 40, p. 103-164, 1989.

MUELLER-DOMBOIS, D.; ELLEMBERG, H. A. **Aims and methods of vegetation ecology**. New York: John Wiley, 1974.

ODUM, E.P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1988.

OLIVEIRA, A. R.; FREITAS, S. P. Levantamento fitossociológico de plantas daninhas em áreas de produção de cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, v. 26, n. 1, p. 33-46, 2008.

PAVANI, M. C. M. D., et al. Banco de diásporos no solo. In: BERGER, G. U.; FAVORETTO, L. R. G. **Monitoramento Ambiental Soja Roundup Ready**. Botucatu: Editora FEPAF, 2014. p. 605-623.

PITELLI, R. A. Estudos fitossociológicos em comunidades infestantes de agroecossistemas. **J. Conserb**, v. 1, n. 2, p. 1-7, 2000.

RADOSEVICH, S. R.; HOLT, J. S. "**Weed Ecology: Implications for Vegetation Management**". New York: Wiley, 1984.

RODRIGUES, J. S. et al. Estudos fitossociológicos de plantas daninhas em diferentes sistemas de rotação de culturas. In: Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas, 27., 2012, Campo Grande. **Anais**..., Campo Grande: SBCPD, 2012. p. 769–775.

RODRIGUES, R.; GANDOLFI, S. Restauração de florestas tropicais: subsídios para uma definição metodológica e indicadores de avaliação de monitoramento. In: DIAS, L.E.; MELLO, J. W. V. de. (Ed.). **Recuperação de áreas degradadas**. Viçosa: UFV, 1998. p. 203-215.

SCHAFFRATH, V. R. et al. Variabilidade espacial de plantas daninhas em dois sistemas de manejo de solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 11, n. 1, p. 53-60, 2007.

SHIRATSUCHI, L. S. **Mapeamento da variabilidade espacial das plantas daninhas com utilização de ferramentas da agricultura de precisão**. 2001. 116 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

SQUASSONI, V. L. **Monitoramento da comunidade de plantas daninhas na cana-de-açúcar e da eficácia de controle químico por meio de técnicas de análise multivariada de dados**. 2012. 110 f. Dissertação (mestrado e produção vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2012.

TAVARES, C. J. et al. Fitossociologia de plantas daninhas na cultura do feijão. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 8, n. 1, p.27-32, 2013.
TUFFI SANTOS, L. D. et al. Levantamento fitossociológico em pastagens degradadas sob condições de várzea. **Planta Daninha**, v. 22, n. 3, p. 343-349, 2004.

VOLL, E. et al. Dinâmica do banco de sementes de plantas daninhas sob diferentes sistemas de manejo do solo. **Planta Daninha**, v. 19, n. 2, p. 171-178, 2001.

CAPÍTULO 4

INTERFERÊNCIA: CONHECER PARA USÁ-LA A NOSSO FAVOR

Neriane Hijano[1]
Izabela Orzari[1]
Wendy Linares Colombo[2]
Mariluce Pascoina Nepomuceno[1]
Pedro Luís da Costa Aguiar Alves[3]

[1]Doutora em Agronomia (Produção Vegetal) - Universidade Estadual Paulista (FCAV/UNESP); [2]Engenheiro Agrônomo - Universidade Estadual Paulista (FCAV/UNESP); [3]Prof. Dr. Universidade Estadual Paulista (FCAV/UNESP).

1 INTRODUÇÃO

A sociedade sabe da necessidade da mitigação dos efeitos deletérios ao meio ambiente que, provavelmente, tenham sido causados pelo uso indevido de produtos químicos na agricultura. Nesse contexto, tem sido cada vez mais comum a procura por novos sistemas de manejo integrado que almejam ajudar no controle ou na supressão de comunidades infestantes. O manejo integrado de plantas daninhas vem auxiliar na sustentabilidade dos sistemas de produção através do uso de técnicas que visam a reduzir o uso intensivo de herbicidas para o controle de plantas daninhas (BRIGHENTI; BRIGHENTI, 2009). Para que esse controle seja efetivo, necessita-se conhecer a biologia das plantas daninhas e a interação destas com as culturas agrícolas.

A interação entre plantas pode ser entendida como positiva ou negativa. A interação positiva está relacionada aos benefícios que o convívio entre plantas pode trazer, como maior cobertura do solo, melhorando aspectos químicos, físico e biológicos do solo (PITELLIi, 2014). Por outro lado, a interação negativa refere-se à interferência que uma planta causa no crescimento e no desenvolvimento de outra, provocando assim queda na produtividade em áreas agrícolas (VIDAL, 2014). Entre os fatores mais importantes a serem entendidos sobre a interação de plantas, está a interferência.

Entende-se por interferência entre plantas o efeito adverso que uma planta pode exercer sobre o crescimento e o desenvolvimento de outras que se encontram próximas e quando se pensa em plantas daninhas, o termo interferência refere-se ao conjunto de ações que recebe uma determinada cultura ou atividade do homem, em decorrência da presença das plantas daninhas num determinado ambiente.

Desta forma, observa-se que a interferência está relacionada a vários aspectos e, segundo Pitelli (1985), o grau de interferência das plantas daninhas nas culturas depende de vários fatores ligados à cultura, às plantas daninhas, ao meio ambiente e ao manejo, conforme ilustrado na Figura 1. Dentre estes fatores, a época e a extensão do período de convivência são uns dos principais fatores que afetam o grau de interferência entre culturas e plantas daninhas.

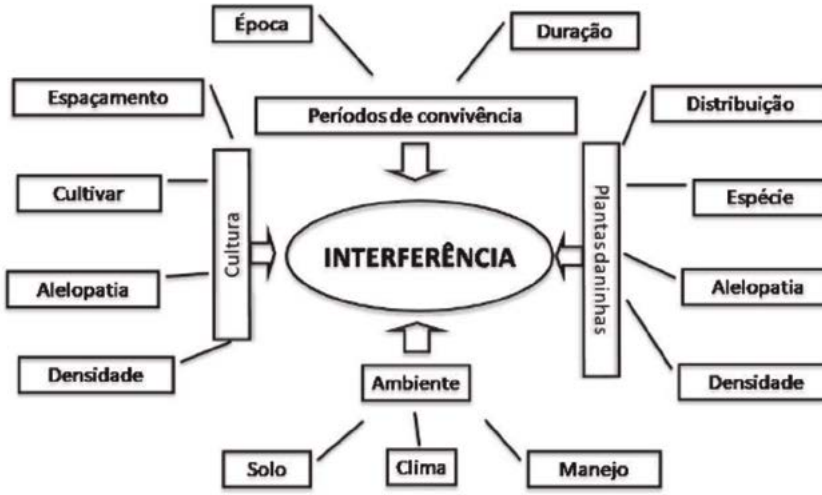


Figura 1. Representação esquemática dos fatores que influenciam o grau de interferência entre as plantas daninhas e a cultura
Fonte: Adaptado de Pitelli (1987).

A interferência da comunidade infestante nas espécies cultivadas pode ser dividida em três grupos: interferência direta, interferência indireta e interferência na operacionalização do processo produtivo.

Dentre as interferências diretas sobre as espécies cultivadas, destacam-se a interferência competitiva, que é a redução de um ou mais recursos limitantes no ambiente, como a luz, nutrientes ou água; e a interferência alelopática, que é a produção e a liberação de compostos químicos por tecidos vivos ou em decomposição, que interferem no crescimento de plantas próximas (SOUZA et al., 2003). Esta liberação de compostos no meio deve ser estudada como uma possibilidade de controle da comunidade infestante e de serem desenvolvidos novos aleloquímicos fitotóxicos, ou bioerbicidas, como alternativa aos herbicidas comerciais, já que os compostos originados de plantas, os aleloquímicos, são mais sistêmicos e mais facilmente biodegradáveis que os pesticidas sintéticos (RIZVI et al., 1980). Outra motivação para novas descobertas de bioerbicidas resulta da resistência de espécies de plantas daninhas aos herbicidas comerciais atuais, sendo que atualmente são registrados 50

casos de resistência a herbicidas no Brasil.

Dentre as interferências indiretas sobre as culturas, sobressaem os efeitos físicos ou biológicos que intervêm nas plantas próximas, como, por exemplo, a ação de herbívoros, danos físicos causados por trepadeiras, hospedeiras intermediárias de pragas e doenças, proteção de inimigos naturais e propagação de incêndios.

A interferência na operacionalização do processo produtivo contempla alguns tipos de interferência que não atuam diretamente sobre as plantas cultivadas, mas sobre o funcionamento da propriedade rural, envolvendo trabalho e despesas, e alterando a eficiência do homem e de várias operações culturais, como aplicações de defensivos, irrigação, colheita e retirada do produto, por exemplo.

2 COMO USAR A INTERFERÊNCIA A NOSSO FAVOR?

O estudo do grau de interferência deve ser amplo, já que este é afetado por fatores relacionados à comunidade infestante (composição específica, densidade e distribuição), a própria cultura (espécie, variedade ou cultivar, espaçamento e densidade de semeadura) e a época e extensão do período de convivência, assim como pelas condições climáticas, edáficas e de tratos culturais (Figura 1). O manejo que proporciona melhores condições à cultura, como uma ocupação do meio mais eficiente por esta, estará reduzindo a interferência da comunidade infestante sobre a cultura (PITELLI, 1987).

2.1 Competição

A competição pode ser definida como a interação entre indivíduos, provocada pela exigência mútua de um recurso limitado, causando a redução no crescimento e no desenvolvimento da espécie menos adaptada (WILSON, 1988). A competição é influenciada por dois fatores, o potencial de habilidade competitiva e a plasticidade fenotípica (PARK et al., 2001), sendo que estas características intrínsecas às espécies refletem a capacidade da planta em captar recursos (ZANINE;

SANTOS, 2004), sendo a água, a luz, os nutrientes minerais essenciais e o espaço os recursos de maiores demandas na competição (PITELLI, 1987).

Esta necessidade de recursos varia com a espécie e seu estádio fenológico, ou seja, há períodos em que a presença de plantas daninhas não causará prejuízos quanti e qualitativos à produtividade da cultura. O conhecimento desses períodos viabiliza o planejamento do manejo da cultura para que o controle de plantas daninhas seja mais eficiente e menos impactante. Sendo assim, foram definidos três períodos de interferência das plantas daninhas na cultura: o período anterior à interferência (PAI), o período crítico de prevenção à interferência (PCPI) e o período total de prevenção à interferência (PTPI) (PITELLI; DURIGAN, 1984).

É mais estudado o período a partir do plantio/semeadura em que as culturas devem ser mantidas livres da presença das plantas daninhas para que a produção não seja afetada quantitativa e/ou qualitativamente. Na prática, esse deve ser o período em que as capinas ou o efeito residual do herbicida deve cobrir. É interessante esclarecer o significado deste período em termos de interferência: as espécies de plantas daninhas que emergirem neste período, em determinada época do ciclo da cultura, terão atingido tal estádio de desenvolvimento que promoverão uma interferência sobre a cultura capaz de reduzir, significativamente, sua produtividade econômica. Por isso, é chamado por Pitelli e Durigan (1984) de período total de prevenção à interferência (PTPI), após o qual a própria cultura, por meio, principalmente, do sombreamento, controla e impede o crescimento das plantas daninhas. Assim, toda e qualquer prática cultural que incrementa o crescimento inicial da cultura pode contribuir para um decréscimo no período total de prevenção da interferência, permitindo menos cultivos ou uso de herbicidas de melhor efeito residual.

Outro tipo de período estudado é a época, a partir do plantio, em que a cultura pode conviver com a comunidade infestante, antes que a interferência se instale de maneira definitiva e reduza, significativamente, a produtividade da cultura, sendo designado por Pitelli e Durigan (1984) de período pré-interferência ou período anterior à interferência (PAI). Seu limite superior retrata a época em que a interferência compromete, irreversivelmente, a produtividade econômica da cultura. A aplicação de certas práticas culturais contribui para a diminuição deste período. Por exemplo, a fertilização incrementa o crescimento da cultura e das plantas da-

ninhas, permitindo que a competição por aqueles recursos não condicionados pela adubação se instale de maneira mais rápida.

Teoricamente, o final do período anterior à interferência seria a época ideal para o primeiro controle das plantas daninhas, pois essas plantas teriam acumulado uma quantidade de energia e de matéria que retornaria ao solo, contribuindo para o próprio desenvolvimento da cultura. Mas, na prática, geralmente, este período não pode ser considerado, pois a cultura e/ou as plantas daninhas podem ter atingido tal estádio de desenvolvimento que inviabilize o uso de práticas mecânicas ou o controle químico.

Finalmente, o terceiro período estudado é o chamado de período crítico de prevenção da interferência (PCPI) que, basicamente, é o controle das plantas daninhas imediatamente antes que os recursos sejam disputados, prolongando-se o controle até um período após o qual as plantas daninhas que emergirem não mais concorram com a cultura. O estudo destes períodos de interferência é estimulado pelas mudanças relacionadas aos sistemas de produção, com o intuito do aumento da produtividade, aliado às práticas de controle. O período de interferência é dependente do grau de interferência das plantas daninhas na cultura e, consequentemente, dos seus fatores de interferência.

A mesma cultura pode variar seu período de interferência devido a estes fatores intrínsecos, como no caso da cana-de-açúcar, em que são relatados PCPIs entre 89 e 138 dias em cana-planta, em convivência com capim-braquiária e com plantio em época de deficiência hídrica (KUVA et al., 2001), e nas mesmas condições em convivência com capim-braquiária e capim-colonião, o período foi entre 74 e 127 dias após o plantio (KUVA et al., 2003). Na primeira condição, a cultura foi plantada com 15 gemas por metro linear, com espaçamento entre linhas de um metro, enquanto na segunda o plantio foi com dois colmos lado a lado no sulco, com espaçamento de 1,35m nas entrelinhas. Também em cana-planta, com convivência com tiririca, o PAI foi de 41 dias após o plantio (KUVA et al., 2000); com corda-de-viola (*Ipomoea hederifolia*), o PAI foi de 76 dias após a emergência (PIZA et al., 2016); para capim-camalote, o PCPI ocorreu entre 54 e 130 dias após plantio (HIJANO, 2016); para cana-soca em convivência com mucuna-preta, relatou-se PCPI entre 50 e 180 dias após a brotação (BRESSANIN et al., 2016). Assim, devido às alterações no ambiente de produção, o período de interferência é modificado e deve ser sempre

estudado e analisado para o manejo mais eficiente da cultura.

O estudo destes períodos de interferência é estimulado pelas mudanças relacionadas aos sistemas de produção, com o intuito do aumento da produtividade, aliado às práticas de controle. O período de interferência é dependente do grau de interferência das plantas daninhas na cultura e, consequentemente de seus fatores de interferência.

Os fatores relacionados à comunidade infestante são intrínsecos às espécies infestantes e, como estas, estão presentes na área de cultivo, ou seja, sua frequência, densidade e distribuição. A agressividade de cada espécie e sua plasticidade fenotípica são importantes para definir a importância desta em cada situação. Para a cultura do grão-de-bico, as espécies *Digitaria nuda*, *Eleusine indica* e *Amaranthus viridis* foram mais agressivas que *Bidens pilosa*, *Raphanus raphanistrum e Cyperus rotundus*, mostrando maior necessidade de controle daquelas mais agressivas (AMARAL et al., 2015), enquanto *R. raphanistrum* apresenta maior interferência sobre a cultura do trigo que *Lolium multiflorum* (RIGOLI et al., 2008), ou seja, a habilidade competitiva depende não apenas da espécie, mas também dos fatores que ela está relacionada, como demanda nutricional, hídrica, térmica e luminosa.

Assim, são diversos os métodos de controle de plantas daninhas e, para um maior espectro e eficácia de controle, todos os métodos devem ser utilizados para o manejo. Os métodos mais usuais são: o mecânico, o químico e o cultural. Este último deve ser utilizado para que se estimulem as características de competição da própria cultura e, para tanto, podem-se associar práticas como época de semeadura, o espaçamento, a densidade de semeadura e a cultivar utilizados para favorecer a cultura de interesse.

Definir estratégias de manejo com foco na cultura torna-se importante, uma vez que ela também tenha potencial de limitar o desenvolvimento de plantas daninhas e não somente esta limitar a produtividade da cultura (KUVA et al., 2001). Para isso, devem ser usadas práticas que estimulem a emergência precoce e o rápido desenvolvimento da cultura, possibilitando o sombreamento precoce das entrelinhas, com consequente inibição da germinação/emergência das plantas daninhas ou a supressão das já existentes.

Outra prática de manejo da cultura inclui a escolha da cultivar, que deve ser realizada devido a suas características fisiológicas e morfológicas. Em estudo

de Rossi et al. (1996), foi verificada diferença na capacidade competitiva entre diferentes cultivares de milho, sendo que a cultivar que teve maior redução na produtividade, devido à interferência pela comunidade infestante, possuía porte baixo, menor área foliar e folhas eretas, o que favorece a maior incidência de luz solar, estimulando o desenvolvimentos de plantas daninhas. Agostinho et al. (2006), avaliando a competitividade de cultivares, verificaram que, sob interferência de uma comunidade de plantas daninhas diversificada e em elevada densidade, as reduções na produtividade foram de 75% para a 'Oirã', 38% para a 'Tégua', 83% para a Runner IAC 886 e de 70% para a 'Caiapó'. Estas mesmas cultivares, sob outra pressão de interferência, convivendo com uma comunidade menos diversificada e em menor densidade, tiveram suas produtividades reduzidas em 20% para a 'Oirã', 34% para a 'Tégua', 50% para a Runner IAC 886 e de 31% para a 'Caiapó'. Desta forma, é possível observar o comportamento diferenciado das cultivares, no qual a Runner IAC 886 se mostrou mais sensível à interferência, enquanto a 'Tégua' se mostrou mais tolerante. Nestes estudos, as cultivares que demonstram maior tolerância à interferência de plantas daninhas devem ser utilizadas em programas de melhoramento genético, visando ao emprego destas em áreas com grande infestação.

Ainda pode ser notada em uma mesma cultura a diferença entre hábito de crescimento e porte desta, como é o caso do feijão, em que cultivar de porte ereto, associada ao menor número de ramificações, apresenta menor potencial competitivo devido à menor cobertura do solo, enquanto cultivares que ramificam mais e cobrem melhor o solo, possuem menor infestação de plantas daninhas na área de cultivo (TEIXEIRA et al., 2009). Esta diferença de interferência pode ser observada com a mesma cultivar em diferentes épocas de plantio, devido à diferença na comunidade infestante.

Teixeira et al. (2009) verificaram que a safra das "águas" teve maior interferência de plantas daninhas que a safra da "seca", já que, na primeira, predominaram-se as espécies monocotiledôneas; enquanto na outra, as dicotiledôneas. O mesmo foi verificado por Barroso et al. (2010), em que o feijão teve maior produção na safra da seca devido ao menor desenvolvimento das plantas daninhas nesta época, sendo ainda a cultivar Rubi mais competitiva que a cultivar Carioca em relação à competição com plantas daninhas.

Estas características de desenvolvimento inicial propiciam maior capaci-

dade competitiva, assim como esta é estimulada pela velocidade de crescimento do sistema radicular. Desta forma, analisar a competição entre plantas, em relação à parte aérea e à radicular, é de grande importância, pois mesmo as espécies que possuem rápida expansão foliar podem não ter domínio da área se não tiverem capacidade competitiva para absorção de água e nutrientes (ZANINE; SANTOS, 2004).

Outra questão importante em relação à competição entre plantas é que ela pode ser considerada como um processo físico, pois uma planta modifica as condições do ambiente ao seu redor, transformando-o também para outra planta. Neste sentido, mudam-se as condições de luminosidade devido à barreira física que impede a passagem de luz, e diminui-se a disponibilidade de espaço e dos demais recursos (PITELLI, 2014).

Tratando-se da interceptação da radiação solar, mesmo que esta seja um recurso infinito, a presença do dossel de uma planta sobre outra altera a quantidade e a qualidade de luz que será recebida (VIDAL, 2010; PITELLI, 2014). No caso de áreas agrícolas, as plantas daninhas podem provocar este efeito quando apresentam maior velocidade de crescimento, composição, distribuição e densidade em relação à cultura, da mesma forma que esta pode impedir o desenvolvimento de plantas daninhas nas entrelinhas, quando ocorre seu fechamento (BARROSO et al., 2012; BEZERRA et al., 2014; PITELLI, 2014).

A percepção da luminosidade pelas plantas ocorre através dos fotorreceptores, como os fitocromos e os criptocromos, que são pigmentos capazes de captar os comprimentos de onda do espectro de luz da radiação solar (KAZAN; MANNERS, 2011; MEREB, 2017). Em condição de sombreamento, ocorre uma alteração no balanço dos comprimentos de onda vermelho (V ~ 700 nm) e vermelho-distante (VD ~ 700-800 nm), gerando redução na taxa de V:VD (FRANKLIN; WHITELAM, 2005; MORENO et al., 2009; NOZUE et al., 2015).

Também é através deste mecanismo que ocorre a detecção da presença de outras plantas vizinhas, sendo que esta detecção acontece desde o início do ciclo de crescimento através das mudanças na quantidade e na qualidade da luz recebida. Com isso, a planta passa a alocar sua energia para o crescimento dos ramos, a fim de sair desta situação luminosa (VIDAL, 2012). Este é o cenário encontrado quando há plantas competidoras junto à cultura, pois a proximidade dos tecidos, além de causar o sombreamento, torna-se um filtro para a passagem da luz, o que aumenta a

quantidade de VD disponível, provocando redução na radiação fotossinteticamente ativa (PAR – photosynthetically active radiation) (NOZUE et al., 2015; KIM et al., 2016).

Nesta situação, a planta desenvolve maneiras de se adaptar ao meio para melhorar a captação da energia solar, alterando suas respostas fotomorfogênicas e desencadeia a chamada "Síndrome de evitação da sombra" (SAS – shade avoidance syndrome) (MORENO et al., 2009; BALLARÉ, 2014). Os efeitos de resposta para o SAS implicam alongamento do hipocótilo em plântulas e pecíolos (estiolamento), baixa relação da parte aérea/raiz, alterações morfológicas, alteração no movimento das folhas, aceleração do período de florescimento, entre outras respostas fisiológicas ao longo do ciclo de vida do organismo (MEROTTO et al., 2009; MORENO et al., 2009; NOZUE et al., 2015).

Todas as mudanças provocadas pelo sombreamento resultam, por consequência, na queda da produtividade nas áreas agrícolas (CASAL, 2013; KIM et al., 2016). Kim et al. (2016) observaram que a luz refletida entre plantas daninhas vizinhas à cultura da soja (baixa relação V:VD) representa um papel fundamental no crescimento e no desenvolvimento das plantas, uma vez que essa condição promove as respostas ao SAS.

Outro termo usado para denominar este fenômeno é o inicialismo, que se trata do primeiro processo de interação planta-planta (VIDAL et al., 2008). De acordo com Vidal et al. (2012), este termo estaria mais adequado para nomear o convívio entre plantas em que uma seria prejudicada enquanto a outra teria vantagem na competição ou, pelo menos, nada sofreria. Além disso, alterações no balanço V:VD acarretam modificações no balanço hormonal e, consequentemente, nas respostas morfológicas da planta. Esta mudança morfológica poderá implicar negativamente outras variáveis que a planta precisará suportar, como um estresse hídrico e competição por outros recursos (VIDAL, 2012).

A adubação também é um fator que pode influenciar na interferência das plantas daninhas na cultura, possibilitando seu manejo através deste. Bressanin et al. (2013) verificaram que na cultura do feijão, quando usada adubação nitrogenada de cobertura o PAI é de 38 dias após a emergência da cultura, enquanto em área sem uso de nitrogênio em cobertura o PAI é de 18 dias após a emergência, ou seja, a adubação favoreceu a cultura em relação à competição com plantas daninhas. Já

Salgado et al. (2006) relataram em trabalho de milho e tiririca, em resposta à adubação fosfatada, que a cultura possui uma resposta mais intensa à adubação, limitando o crescimento populacional da tiririca em solos bem fertilizados com fósforo.

O manejo sobre o ambiente pode interferir no período e na capacidade de interferência de plantas daninhas na cultura. Duarte Júnior et al. (2009) relataram que a incidência de plantas daninhas na cana-de-açúcar com preparo convencional foi 530% superior à cana-de-açúcar em sistema de plantio direto, mostrando que a mudança no ambiente pode modificar completamente a infestação e, consequentemente, o manejo necessário para a área. Os fatores que interferem no sistema devem ser usados a favor do manejo para o controle de plantas daninhas, entre os quais está o espaçamento e a densidade de plantio da cultura. Em trabalho desenvolvido por Scholten et al. (2011), para o feijão cultivado na mesma época e local, houve o aumento de 14 dias no período anterior à interferência, diminuindo o espaçamento entre as linhas e a densidade de semeadura.

A habilidade competitiva das espécies deve ser conhecida e utilizada para favorecer a maior produtividade da cultura, desenvolvendo estratégias de manejo integrado das plantas daninhas, promovendo o uso racional de herbicidas, para evitar a seleção de plantas daninhas resistentes a herbicidas e para diminuir os impactos ambientais.

2.2 Alelopatia

O termo alelopatia foi definido por Hans Molisch, em 1937, como o efeito que uma planta exerce sobre outra devido à produção e à liberação de metabólitos secundários no ambiente, afetando seu crescimento e seu desenvolvimento, de forma benéfica ou prejudicial (RICE, 1984; INTERNATIONAL ALLELOPATHY SOCIETY, 1996).

São quatro os meios de liberação de compostos químicos pelas plantas: decomposição, lixiviação, volatilização e exsudação radicular (MEDEIROS, 1990; ALMEDA, 1991; RODRIGUES et al., 1992; DURIGAN, 1993).

Através do processo de decomposição, os constituintes químicos dos organismos são liberados para o ambiente e são, frequentemente, adicionados ao solo. Esse processo envolve a participação dos microrganismos presentes no solo, os quais

agem sobre os polímeros presentes nos tecidos, levando à liberação dos compostos tóxicos (SOUZA FILHO; ALVES, 2002). A intensidade dos efeitos alelopáticos depende da concentração dos aleloquímicos, de forma que, para resíduos vegetais deixados em cobertura, há uma tendência para a ação mais pronunciada destas substâncias. A decomposição de resíduos vegetais implica uma função não ativa da planta, enquanto os processos de exsudação e volatilização envolvem a planta viva.

A lixiviação é a remoção de substâncias químicas de plantas vivas ou mortas, pela ação de chuvas, orvalhos e neblina (SOUZA FILHO; ALVES, 2002), ou seja, compreende sobretudo a remoção de substâncias hidrofílicas. Já na volatilização, os aleloquímicos são liberados na forma volátil e é um processo comum nas plantas aromáticas, embora nem todas as plantas aromáticas estejam envolvidas no fenômeno de alelopatia (SOUZA FILHO; ALVES, 2002).

Os exsudados radiculares são substâncias sintetizadas pelas plantas e liberadas no solo pelas raízes vivas. Esse termo tem sido usado para descrever todas as substâncias orgânicas exsudadas por raízes, em qualquer mecanismo (RICE, 1984). O fenômeno de exsudação radicular é muito importante, especialmente quando os aleloquímicos liberados pelas raízes se associam à presença de microrganismos no solo, podendo ter efeito direto nas raízes de outras plantas ou, simplesmente, ficarem armazenados no solo (REIGOSA et al., 1999). É necessário que os aleloquímicos liberados no ambiente se acumulem em quantidades suficientes para afetar outras plantas e que se mantenham por algum tempo para que se possa verificar o efeito alelopático (ALMEIDA, 1988).

Com modificações químicas, alguns metabólitos secundários de plantas com fitotoxidade podem ser a base de novos herbicidas, auxiliando no manejo efetivo da produção agrícola. Na descoberta de novos aleloquímicos (bioprospecção), o isolamento biodirigido (ou isolamento bioguiado) é um dos métodos que podem ser utilizados para a pesquisa de novos compostos fitoquímicos. Neste método, é possível determinar as frações que possuem maior atividade biológica. Após a identificação da fração mais ativa, esta é fracionada novamente com o objetivo de purificar e de identificar os compostos presentes (MACÍAS et al., 1998). O potencial alelopático é avaliado através de bioensaios, no qual são utilizadas as respostas biológicas para direcionar as fases de extração, fracionamento, purificação e identificação dos compostos (DUKE, 2015) (Figura 2).

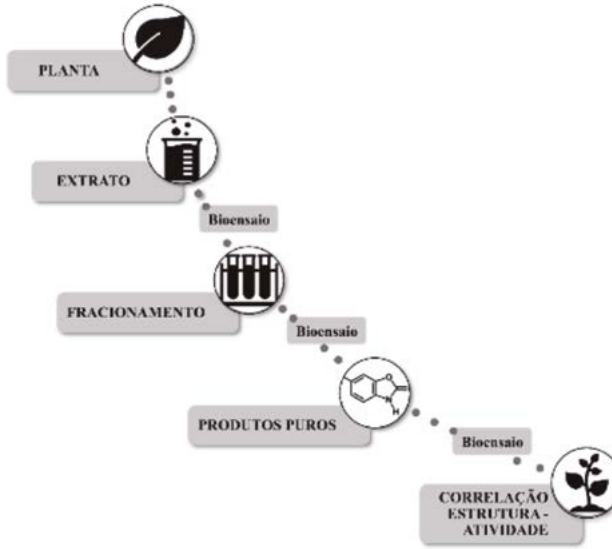


Figura 2. Esquema com as etapas do isolamento biodirigido de compostos.

A ação dos aleloquímicos nas plantas pode apresentar alguns efeitos específicos como: modificação na estrutura e no transporte das membranas, alterações das características da morfologia celular, interferência no ciclo celular (replicação, síntese de proteínas, mitose, mecanismos celulares), modificação da atividade de fitormônios, perturbação do metabolismo energético (respiração e fotossíntese), problemas no balanço de água e na função dos estômatos, inibição de síntese de pigmentos e bloqueio da função de numerosas enzimas (EINHELLIG, 1986; EINHELLIG, 2002). Assim, a alelopatia, com estudos bioquímicos de interações planta-planta, tem sido proposta como possível alternativa para o manejo de plantas daninhas na agricultura (MACÍAS, 1996; TAIZ e ZEIGER, 2013), em diferentes sistemas de manejo e de produção.

Entretanto, apesar de a alelopatia ser uma alternativa para o manejo de plantas daninhas, o potencial alelopático das culturas não é o objetivo para a maioria dos programas de melhoramento genético, que visam ao incremento da produtividade. Esta seleção pode implicar a redução do potencial competitivo da espécie,

que pode estar relacionado à liberação de compostos alelopáticos, já que a energia dispensada para a biossíntese aleloquímica pode diminuir a quantidade disponível para o metabolismo, interferindo no desenvolvimento e na reprodução de plantas. Uma nova abordagem na área de aleloquímicos é o uso de marcadores moleculares para genes que codificam a síntese de aleloquímicos (MACÍAS et al., 2007), podendo desenvolver cultivares com traços alelopáticos (TREZZI, 2016).

2.3 Uso de culturas de cobertura

O manejo de plantas daninhas deve ser baseado na utilização de medidas de controle que visam a afetar o ciclo da comunidade infestante, proporcionando à cultura melhores condições de competição, crescimento e desenvolvimento em relação à comunidade infestante e também desfavorecendo a germinação, a emergência e o crescimento dessas plantas. Uma das medidas de controle que podem ser adotadas é a utilização de plantas como cobertura do solo em sistema de semeadura direta (GOMES; CHRISTOFFOLETI, 2008). Os sistemas de semeadura direta e o cultivo consorciado vêm destacando-se como alternativas viáveis para o controle dessas plantas infestantes, em que, de acordo com Pacheco et al. (2009), a cobertura do solo, através da fitomassa das culturas, pode auxiliar no controle das plantas daninhas por meio dos efeitos físicos, biológicos e químicos (alelopatia).

Sistemas de produção que adotam adubos verdes têm sido muito utilizados nos dias de hoje. Os adubos verdes são plantas propositalmente cultivadas com o objetivo de serem incorporadas ao solo, como fonte de matéria orgânica e de nutrientes para melhorar a produtividade (IGUE et al., 1984), cuja amplitude desta técnica pode variar de acordo com a quantidade e com a qualidade do adubo verde, condições edafoclimáticas e práticas culturais adotadas (ARF et al., 1999). Através da formação de cobertura morta, e pelos seus efeitos físicos e químicos (alelopáticos), os adubos verdes afetam qualitativa e quantitativamente distintas infestações de espécies daninhas (CALEGARI, 1998).

Uma das espécies utilizada como planta forrageira e/ou adubo verde é o *Sorghum bicolor*. Esta espécie possui em sua composição química o composto sorgoleone. O sorgoleone é um aleloquímico que afeta a fotossíntese, a respiração e a

atividade da enzima p-hidroxifenilpiruvatodesidrogenase, a qual é necessária para a síntese de plastoquinona (MEAZZA et al., 2002). É produzido e liberado principalmente por pelos radiculares, que são altamente ativos na síntese e na exportação dos compostos, e interagem com muitos organismos, incluindo plantas daninhas (CZARNOTA et al., 2003). Devido a esta característica, também tem alto potencial alelopático. A pulverização de extrato de *S. bicolor* na cultura do trigo apresenta até 54% de controle das espécies infestantes (CHEMMA et al., 2000). E quando em combinação com outros extratos de adubos verdes (*Brassica campestris e Helianthus annuus*), atinge 50% de controle após a aplicação via foliar (ARIF et al., 2015).

Outra forrageira utilizada principalmente em rotação com a cultura do milho é o *Dolichos lablab* ou popularmente conhecida como Lablab. Uma planta leguminosa muito utilizada como planta consorciada com gramíneas forrageiras, capineiras, feno e silagem. Excelente produtora de biomassa e nitrogênio. Hoje, já se sabe que o Lablab apresenta aleloquímicos responsáveis por suprimir plantas de *Cyperus rotundus* em 39% (MOREIRA et al., 2013). Outra planta, o *Calopogonio mucunoide*, *assim* como o Lablab, também possui potencialidades alelopáticas, e a parte aérea, seguida das raízes, constitui-se na principal fonte de substâncias químicas com atividades potencialmente alelopáticas, solúveis em água (SOUZA FILHO et al., 1997).

Culturas de inverno, como tremoço e aveia, vêm sendo adotadas com o intuito de suprimir as plantas daninhas. O tremoço é uma leguminosa conhecida por apresentar compostos alelopáticos denominados alcaloides. Essas substâncias podem ser encontradas em diferentes partes do vegetal (SOTTOMAYOR et al., 2004) e em representantes de diversas famílias (LORENCE; NESSLER, 2004). Segundo Wink e Bvardowski (1992), alcaloides liberados por plantas de tremoço inibiram a germinação de sementes de alface e de planta daninha, funcionando como um composto alelopático. Segundo Taiz e Zeiger (2009), além dos alcalóides serem substâncias produzidas em resposta à herbivoria, estas também podem agir em nível celular e prejudicar o transporte seletivo das membranas celulares.

Experimentos preliminares mostraram que as plantas de tremoço podem reduzir as plantas daninhas sob condições experimentais (WINK, 1984). Os tremoceiros utilizados como adubo verde tendem a ter um efeito benéfico sobre o crescimento sucessivo de culturas (MCKEE, 1947; MANN, 1958; GONCHAR, 1961; MIYASKA, 1967). Planta de tremoço-branco incorporada ao solo aumentou os ren-

dimentos de algodão e também suprimiu o crescimento de plantas daninhas durante as primeiras semanas após a semeadura (OFFUTT, 1971).

Já a aveia-preta (*Avena strigosa*) é empregada principalmente na produção de forragem e de cobertura do solo, com grande efeito na proteção e na melhoria das condições físicas e sanitárias do solo (SANTI et al., 2003). Na aveia, os ácidos fenólicos, ferúlico, cumáricos, siríngico, vanílico e p-hidroxibenzoico (GUENZI; MACCALLA, 1966; GUENZI; MACCALLA, 1967) e a escopoletina (FAY; DUKE, 1977) foram identificados exercendo efeito sobre a germinação e o desenvolvimento de plântulas de plantas-daninhas. No Brasil, cerca de cinquenta e uma cultivares de aveia-branca e nove cultivares de aveia-preta estão registradas para o cultivo. Como o efeito alelopático da aveia depende do genótipo utilizado (WU et al., 1999), esse fator oferece oportunidades para se adotar cultivares com maior potencial alelopático que podem ser utilizadas no manejo de plantas daninhas.

Outros sistemas de produção como a utilização de *Eucalyptus* na Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e silvipastoril, vêm destacando-se no setor agropecuário brasileiro por ser uma espécie que apresenta efeitos alelopáticos. Têm sido frequentemente relacionados fatores alelopáticos a espécies de *Eucalyptus*, uma vez que, em plantios dessas espécies, em geral, a cobertura e a diversidade de vegetação são reduzidas (OMORO et al., 2010). Para espécies de *Eucalyptus*, várias formas de liberação de aleloquímicos são possíveis, tanto a partir de folhas quanto de raízes (ZHANG; FU, 2010; HE et al., 2014).

É provável que a maior capacidade do eucalipto em afetar outras plantas seja pela serapilheira, também conhecida como cobertura vegetal morta, do que pelas folhas da copa, uma vez que as folhas da serapilheira permanecem em contato com a água da chuva por maior período. Pelo mecanismo de volatilização, a única forma possível de contato entre os voláteis emitidos e as espécies receptoras seria pela serapilheira. A serapilheira acumulada sobre o solo pode afetar a vegetação não só por fatores químicos, mas também devido à supressão mecânica (ROTUNDO; AGUIAR, 2005) ou à redução na incidência de radiação solar (JENSEN; GUTEKUNST, 2003). Sabe-se que um dos fatores determinantes na germinação das sementes de algumas espécies é a presença de luz, e isso pode ser constatado nas sementes de muitas plantas daninhas.

Como uma camada densa de serapilheira se forma sobre o solo nos plan-

tios da cultura do eucalipto, a quantidade de aleloquímicos liberados pode ser alta, o que maximiza a possibilidade de alelopatia. Esse conjunto de fatores indica que uma espécie de *Eucalyptus* consiste em um bom modelo de planta doadora, que tem como característica a supressão de espécies infestantes.

Na prática, existe dificuldade em separar os processos de interferência, em identificar se o processo ocorre por competição ou por alelopatia, e por isso fazem-se necessários os estudos de interferência. Para a alelopatia, além de identificar o potencial de uma espécie, é importante, também, isolar, identificar e quantificar as substâncias que causam estes efeitos para que a pesquisa tenha continuidade até à descoberta de novos compostos químicos com capacidade de inibição de plantas daninhas.

Nos últimos anos, o laboratório de plantas daninhas (LAPDA) da Unesp de Jaboticabal tem trabalhado com o objetivo de procurar novos compostos de "Herbicidas Naturais", mais específicos e inócuos, que ajudem a proteção integral do meio ambiente, reduzindo o uso químico no controle de plantas daninhas. Foi identificada em campo a interferência da *Bidens sulphurea* sobre *Panicum maximum* na cultura de café; a partir disto, começaram os estudos de isolamento biodirecionado para determinar se os efeitos inibitórios ocorriam devido à presença de compostos fitotóxicos, e a partir disto 26 compostos foram isolados de folhas e raízes, sendo quatro compostos identificados pela primeira vez, sendo os principais os sesquiterpenos lactonas, costunolide, reynosina e santamarina, e estas mostraram uma inibição acentuada de *Amaranthus viridis* e *Panicum maximum*. Estes resultados possibilitam o uso de *B. sulphurea* como cultura de cobertura, assim como a descoberta de novas moléculas possibilita a produção de novos herbicidas (SILVA et al., 2017).

A diminuição da produtividade da soja, semeada após a dessecação de pastagens de *Urochloa ruziziensis*, usando glifosato, foi relatada por produtores, e a partir disto foi realizado o estudo de extração e de identificação de compostos, isolando como principal composto a protodioscina, uma saponina esteroidal, o que explica a diminuição da produtividade da soja (NEPOMUCENO et al., 2017).

Vernonia ferruginea, uma planta nativa do Cerrado, infestante agressiva de pastagem, tem a capacidade de liberar substâncias tóxicas, como ácidos clorogênicos, flavonoides e lactonas sesquiterpênicas, que inibem tanto a germinação como o crescimento de outras plantas. Quando submetida a diferentes condições de desen-

volvimento, ocorre desvios de rotas biossintéticas de metabólitos, potencializando sua capacidade fitotóxica (AMARAL, 2017).

2.4 Uso de cultivos consorciados *(Intercropping)*

O manejo de plantas daninhas através do cultivo consorciados causa alterações na comunidade infestante e possibilita o uso de outros métodos de controle. Além disso, esta prática de controle cultural permite que as culturas expressem seu máximo potencial de produção e de competitividade, pois o próprio manejo das culturas provoca modificações no sistema (solo, água, espaço, etc.) (MACIAL, 2014). A combinação dos fatores cultivar, espaçamento e densidade é fundamental quando se considera que a própria cultura é a melhor ferramenta para o controle das plantas daninhas, pois ela terá o crescimento predominante durante a convivência entre plantas (PITELLI, 1985).

A escolha das culturas para o consórcio deve considerar o hábito de crescimento e as características intrínsecas das espécies, que devem ser diferentes para que não ocorra competição entre elas (MACIAL, 2014). Um exemplo é o consórcio com espécies forrageiras, uma vez que podem ser semeadas simultaneamente ou após a implantação da cultura principal, e as plantas irão germinar, emergir e conviver, necessitando de espaço e de demais recursos, o que pode ocasionar prejuízos para ambas as espécies consorciadas se não houver uma defasagem de crescimento entre ambas (DAN et al., 2012).

Também é preciso considerar que ambas as espécies em consórcio liberam substâncias alelopáticas que devem ser nocivas para as plantas daninhas, e também promover sinergismo entre as culturas ou ter efeito neutro, sem trazer prejuízos entre elas (DAN et al., 2012; SOUZA FILHO, 2014;). De acordo com Souza Filho (2014), em sistemas de pastagens, a interação alelopática entre espécies gramíneas e leguminosas usadas em consórcio seria de baixa magnitude, enquanto a interação com as plantas daninhas neste sistema seria de alta intensidade. Isto resultaria em pastagens mais equilibradas, produtivas e de maior ciclo, gerando menor custo de manutenção da pecuária e aumento de lucratividade.

O consórcio de culturas com foco no manejo das plantas daninhas pode ser

empregado em sistemas de plantio direto, uma vez que se diminui o revolvimento do solo e possibilita a formação de uma cobertura de restos vegetais sobre sua superfície. Esta cobertura torna-se uma barreira física que prejudica a germinação e a emergência de plântulas, além da liberação de compostos alelopáticos (BORGHI et al., 2008). Também é observado que, nestas condições, a concentração de sementes é mais próxima à superfície, e mesmo que a semente germine haverá perda de sua viabilidade (BORGHI et al., 2008). Em estudo realizado por Ikeda et al. (2007), os autores observaram redução significativa no banco de sementes de plantas daninhas em áreas de rotação de culturas e de plantio direto, em comparação com área de monocultivo.

A cultura do milho é uma das mais utilizadas para o sistema de cultivo consorciado, pois sua planta apresenta maior capacidade de competição em relação a diversas espécies (plantas daninhas e forrageiras), e sua implementação é mais fácil quando comparada a outras culturas anuais (DAN et al., 2012). Por esta razão, o cultivo consorciado de milho com forrageiras é amplamente utilizado no Brasil, com a vantagem de diminuir a infestação de plantas daninhas devido à rápida e elevada produção de biomassa destas culturas e da liberação de substâncias alelopáticas no solo (BORGHI et al., 2008; DAN et al., 2012).

O convívio milho+forrageira possibilita diferentes combinações, gerando modelos de competição e alelopatia variados, reduzindo o banco de sementes e modificando a pressão de seleção de plantas daninhas específicas (SEVERINO et al., 2006). Borghi et al. (2008) verificaram controle de 95% de plantas daninhas no sistema de consórcio de milho com *Brachiaria brizantha* na linha+entrelinha, em ambos os espaçamentos de 45 e 90 cm.

A adoção de espécies perenes no cultivo consorciado também é eficiente para o manejo de plantas daninhas (TAVELLA et al., 2014). Silva et al. (2015) verificaram que o consórcio entre milho e a espécie arbórea sabiá (*Mimosa caesalpiniifolia*) foi eficiente no controle das plantas daninhas, principalmente devido ao porte desta planta, sua maior capacidade competitiva e alelopática.

O consórcio também é uma boa alternativa para o cafeeiro, uma vez que esta cultura perene é sensível à matocompetição, provocando perdas de até 20% de produtividade (ALCÂNTARA; FERREIRA, 2009). Consórcio do cafeeiro e outras espécies arbóreas promovem maior sombreamento do solo, o que afeta a presença

das plantas daninhas (SILVA et al., 2013). Coelho et al. (2004) observaram que as espécies gliricídia (*Gliricidia sepium*) e bananeira (*Musa spp.*), em cultivo consorciado de café (*Coffea canephora*) causaram sombreamento de 86% em relação à passagem de luz em café solteiro, o que provocou a redução de 99% na massa seca de plantas daninhas presentes nas entrelinhas.

Silva et al. (2013), testando as cultivares IAC 9-20, IAC 4-20 e HAES 816 de nogueira-macadâmia (*Macadamia integrifolia*), consorciada com café (*Coffea arabica*), verificaram redução de plantas daninhas em todos os sistemas, mas a cultivar IAC 9-20 obteve melhores resultados, uma vez que sua projeção de copa é mais alta e tem maior diâmetro que as demais, o que reduz a incidência de luz sobre o solo e inibe a emergência e o estabelecimento das plantas daninhas. O resultado oposto foi verificado com a cultivar IAC 4-20, pois este apresenta menor altura e diâmetro intermediário, deixando a área mais descoberta, o que permitiu uma infestação maior quando comparada com as demais cultivares.

Mesmo o cultivo consorciado sendo considerado uma estratégia vantajosa para o controle das plantas daninhas, ainda é necessário superar desafios para que este sistema seja eficiente para um maior número de espécies cultivadas. É preciso alternativas para amenizar problemas como a competição interespecífica entre as culturas, a baixa disponibilidade de técnicas que podem ser aplicadas para melhorar o consórcio e o crescente número de biótipos de plantas daninhas resistentes a herbicidas, que acabam dificultando outras práticas de manejo nestas áreas de cultivo (DAN et al., 2012).

2.5 Uso de extratos vegetais

Produtos naturais são utilizados na agricultura desde o século XIX para o controle de pragas e doenças. Contudo, após a Segunda Guerra Mundial, caíram em desuso, pois grandes áreas de cultivo das plantas usadas para fornecer estes produtos naturais foram dizimadas. Assim, foram substituídos pelos produtos sintéticos, fato que contribuiu para as grandes mudanças da agricultura, e o uso de produtos naturais e práticas como rotação e consórcio deixaram de ser utilizados por muito tempo (BETTIOL; MORANDI, 2009).

Hoje, é possível analisar os impactos negativos que o uso destes produtos químicos causou ao longo dos anos, principalmente quando em doses excessivas e de forma inadequada. Podem-se citar os prejuízos provocados ao meio ambiente, como a contaminação da água, do solo e de animais; o desequilíbrio biológico, com alteração da ciclagem de nutrientes e da matéria orgânica; a redução da biodiversidade e a eliminação de organismos benéficos; além dos danos observados no próprio sistema agrícola, como a intoxicação dos trabalhadores, a perda de animais intoxicados e o desenvolvimento de plantas daninhas, pragas e doenças resistentes aos produtos químicos (SANTOS et al., 2013).

Por esta razão, a busca por alternativas ao manejo químico faz-se necessária, e práticas relacionadas com a alelopatia têm ganhado destaque para complementar os métodos convencionais (FERREIRA et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2015). Assim, o estudo de extratos vegetais voltou a ter atenção nos últimos anos, não só para substituir herbicidas, mas também como alternativa para lidar com pragas e patógenos e melhorar o manejo integrado em proteção de plantas (SANTOS et al., 2013), e a aplicação destes compostos será cada vez mais importante e necessária de acordo com as limitações econômicas e ecológicas das práticas convencionais (CARVALHO et al., 2012).

O uso de extratos vegetais tem mostrado resultados promissores, formados por novos compostos, que o organismo-alvo não é capaz de inativar, e também trazem vantagens como ser menos agressivos, menos tóxicos, de rápida degradação no ambiente e são derivados de recursos renováveis (FERRAZ et al., 2008). Além disso, apresentam potencial para inseticida, fungicida, herbicida e nematicida (SANTOS et al., 2013).

Os extratos vegetais são preparações concentradas obtidas de matérias-primas vegetais secas ou frescas, tratadas previamente ou não, preparadas com a utilização de solventes, como água ou álcool, que retira os princípios ativos contidos no material vegetal. Estes princípios ativos de interesse são os compostos aleloquímicos produzidos pelo metabolismo secundário das plantas, que são responsáveis por respostas de defesa, reprodução e sobrevivência, e podem ser prejudiciais para plantas vizinhas, pragas e patógenos (VIZZOTTO et al., 2010; SANTOS et al., 2013).

Para o controle de plantas daninhas, o conhecimento das interações entre plantas, sejam espécies daninhas. Sejam cultivadas, é muito importante para que se

estabeleçam os mecanismos corretos para a aplicação de extratos vegetais. Eles podem funcionar como um herbicida natural através de efeitos alelopáticos, afetando tanto o desempenho de plantas vizinhas como provocando um efeito autotóxico, e por isso o conhecimento de suas propriedades e ações são necessários (SANTOS et al., 2013; SOUZA FILHO, 2014). De acordo com Oliveira et al. (2015), os extratos vegetais com potencial herbicida podem aumentar o tempo médio de germinação das plantas daninhas, aumentando, por consequência, seu tempo médio de estabelecimento. Este efeito garante que a cultura tenha seu crescimento e desenvolvimento mais rápido que as plantas daninhas, reduzindo assim a interferência provocada por elas.

Muitas plantas são conhecidas por seu efeito alelopático sobre plantas vizinhas, e por isso são utilizadas para o preparo dos extratos vegetais. Oliveira et al. (2015) constataram que os extratos de braquiária, girassol e sorgo apresentam potencial para serem utilizados como herbicidas naturais, pois causaram redução no crescimento do sistema radicular e prejudicaram a formação de plântulas normais em alface. Este efeito sobre as raízes deve-se à exposição desta estrutura aos aleloquímicos logo após a germinação, prejudicando assim o desenvolvimento natural de uma planta (CHUNG et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2015), mesmo que a germinação das sementes não tenha sido prejudicada. Os autores sugeriram que os aleloquímicos presentes nestes extratos agiram sobre o processo de divisão e de expansão celular da raiz.

A espécie *Stryphnodendron adstringens*, popularmente conhecida como barbatimão, é usada para diferentes funções, entre as quais como planta medicinal, e por isso seus extratos também foram estudados para aplicação na agricultura (BARREIRO et al., 2005). Em seu trabalho, Barreiro et al. (2005) avaliarram o potencial alelopático do extrato aquoso da parte aérea sobre sementes da planta bioindicadora *Cucumis sativus* (pepino), e verificaram que a germinação não foi inibida em nenhum tratamento (extrato fervido ou não, em concentração de 50% e 100%), porém a formação das plântulas foi prejudicada pela presença do extrato.

A leucena (*Leucaena leucocephala Wit*), planta exótica amplamente encontrada no Brasil, é uma espécie muito conhecida por seu efeito alelopático sobre plantas vizinhas e pela sua agressiva disseminação em ambientes de produção agrícola ou em áreas de preservação, por prejudicar o desenvolvimento de plantas nati-

vas (SCHERER et al., 2005). Dado este comportamento, houve o interesse de testar seu extrato sobre diferentes plantas. Scherer et al. (2005) verificaram que o extrato aquoso de frutos de leucena tem maior efeito do que o extrato de folhas sobre a germinação e o desenvolvimento radicular de sementes de canafístula (*Peltophorum dubium*). O extrato aquoso da parte aérea de leucena, obtido com água quente, foi testado sobre a germinação de sementes de milho e causou redução no comprimento da raiz. Já o extrato obtido com água fria e aplicado diretamente sobre o solo não causou problemas na germinação e no desenvolvimento de sementes de milho, o que mostra o potencial herbicida do extrato a ser usado para esta cultura (PRATES et al., 2000).

Rosa et al. (2007) testaram a germinação do capim-colonião (*Panicum maximum*) quando aplicado o extrato aquoso de três espécies, cujos efeitos alelopáticos são conhecidos: tabaco (*Nicotiana tabacum*) e sabugueiro (*Sambucus australis*), que apresentam efeito inseticida; e leucena, que mostra efeito herbicida. Os autores observaram que todos os tratamentos das três espécies, com concentrações de 20%, 40%, 60%, 80% e 100%, provocaram queda na porcentagem de germinação, aumento no tempo médio de germinação e consequente redução na velocidade da germinação, e redução no comprimento de raiz. O mesmo tipo de resultado foi obtido por Ferreira et al. (2007), que observaram o atraso na germinação de sementes de picão-preto (*Bidens pilosa*) quando submetidos ao extrato etanólico de eucalipto (*Eucaliptus citriodora*), outra espécie exótica encontrada no Brasil e com efeito negativo sobre plantas vizinhas.

Estes trabalhos ilustram o potencial no uso de extratos vegetais para o controle de plantas daninhas e as respostas obtidas por plantas de interesse econômico. Apesar dos resultados promissores, muitos estudos devem ainda ser realizados e outras barreiras superadas para que os extratos vegetais possam ser utilizados. Podem-se citar a disponibilidade de matéria-prima; a dificuldade de padronização e controle de qualidade para produtos comerciais, já que os compostos orgânicos têm baixa estabilidade; a degradação é mais rápida; e pode haver a presença de substâncias tóxicas que prejudiquem a manipulação do extrato (SANTOS et al., 2013). Por isso, o investimento tecnológico nas técnicas de extração e a regulamentação de produtos biológicos são cada vez mais necessários para que esta ferramenta possa ser utilizada facilmente na agricultura para o manejo de plantas daninhas.

2.6 Bioprospecção de Herbicidas

A alelopatia, além de atuar como ferramenta no manejo de plantas daninhas, pode fornecer compostos com potencial para a produção de bioerbicidas (SOUZA FILHO e ALVES, 1998). Tais herbicidas, desenvolvidos a partir de aleloquímicos, apresentam benefícios em relação aos herbicidas sintéticos, como a redução do impacto ambiental, maior aceitação do consumidor e facilidade no registro (DAYAN et al., 2012). Os compostos alelopáticos podem ser usados diretamente como bioerbicidas ou ainda estudados como estrutura para o desenvolvimento de herbicidas com novos mecanismos de ação (DAYAN; DUKE, 2014).

A inserção de herbicidas com novos mecanismos de ação é necessária devido ao crescente número de plantas daninhas resistentes aos herbicidas atuais (DUKE, 2012), e os compostos alelopáticos possuem este potencial de fornecer a descoberta de diferentes mecanismos de ação, aumentando a quantidade de opções de escolha para manejo. Portanto, além da descoberta de novos aleloquímicos, torna-se importante, também, a elucidação dos mecanismos de ação destes.

Os ensaios de alelopatia ocorrem, normalmente, em laboratórios, em que são extraídos compostos de uma espécie vegetal, e estes são testados em bioensaios que maximizam os efeitos fitotóxicos, pois são testados, em sua maioria, na ausência de solo, luz ou competição, diferindo da realidade dos resultados do campo agrícola (MACÍAS et al., 2019). Porém, dificilmente as pesquisas atingem a etapa de identificação do mecanismo de interferência nos níveis bioquímico, fisiológico, celular e molecular (INDERJIT; WESTON, 2000; DUKE, 2015;) que possibilitariam a compreensão e o desenvolvimento de novos mecanismos de ação.

Há vários herbicidas derivados de plantas que já estão introduzidos no mercado, entre os quais Cinmethylin (produto natural cineole, proveniente de várias espécies), Benzazin (produto natural benzoxazinonas, proveniente de gramíneas), Quinclorac (produto natural ácido quinolínico, proveniente de *Nicotiana tabacum*) (HATZIOS, 1987) e Mesotrione (produto natural leptospermone, proveniente da *Callistemon citrinus*) (MERISTO, 2018). Porém, a implementação de herbicidas naturais é dificultada devido às características dos aleloquímicos de menor estabilidade no ambiente, baixa eficácia de controle de plantas daninhas e baixa seletividade; entretanto, uma alternativa a estas características vem da possibilidade de imple-

mentar modificações estruturais dos compostos, melhorando as características desejadas (FAROOQ et al., 2018).

Estas modificações podem ocorrer na estrutura da molécula, ou na possibilidade do aumento da solubilidade do produto natural, mas sem modificação da estrutura química; entretanto, estes processos podem alterar a atividade do aleloquímico. Outra possibilidade é o encapsulamento, em que compostos insolúveis ou com baixa solubilidade são envoltos com compostos com maior solubilidade, garantindo a mesma atividade da molécula (MACÍAS et al., 2019). Ainda segundo Macías et al. (2019), existem vários aleloquímicos promissores para futuros bioerbicidas devido à facilidade de seu isolamento, alta atividade fitotóxica e simplicidade da estrutura a ser sintetizada, entre os quais os sesquiterpenos ou lactonas sesquiterpênicas, compostos fenólicos e produtos naturais contendo nitrogênio.

2.7 Identificação de genes e transgenia

O controle químico de plantas daninhas está tornando-se um problema quando manejado incorretamente, tendo como consequência os crescentes casos de plantas resistentes a herbicidas. Considerando este fato, nota-se a importância de outros métodos de supressão de plantas daninhas, entre os quais o alelopático, através do uso de cultivares que possuam potencial de liberação de aleloquímicos com efeito supressor de plantas daninhas, e assim, possa ser reduzido o uso de herbicidas (FAROOQ et al., 2018).

A exploração de cultivares com maior liberação de aleloquímicos e consequente controle de plantas daninhas é propício, também, ao meio ambiente, considerando que ocorre a liberação de produtos naturais, que são menos prejudiciais a este.

Os compostos liberados e sua quantidade variam não apenas entre espécies, mas também entre cultivares (MASUM, 2016), e esta variabilidade pode ser utilizada para o desenvolvimento de cultivares com maior capacidade de supressão de plantas daninhas através do aumento de produção e da liberação de aleloquímicos desejáveis (TREZZI et al., 2016; FAROOQ et al., 2018). Entretanto, o desenvolvimento de cultivares com este objetivo não tem sido prioridade dos programas de melhoramento agrícola, já que a produção de aleloquímicos demanda investimento

energético pela planta, acarretando menor produtividade da cultura (TREZZI et al., 2016). Neste contexto, uma cultivar bem sucedida necessita que, além da liberação de aleloquímicos, tenha alta produtividade, resistência a doenças, insetos, maturidade precoce e traços de qualidade (GEALY; YAN, 2012).

A obtenção de cultivares com elevado potencial alelopático pode ocorrer pelos métodos convencionais de reprodução ou pela engenharia genética, com o desenvolvimento da transgenia (CHENG; CHENG, 2015; TREZZI et al., 2016). O cruzamento entre cultivares antigas, que contenham a característica desejada, e de novas cultivares pode impulsionar o potencial alelopático em uma nova cultivar (BERTHOLDSSON, 2010). Estudos genéticos possibilitam o entendimento da função dos aleloquímicos nas interações entre plantas, podendo avaliar suas limitações (TREZZI et al., 2016).

Utilizando-se da metodologia de estudo biodirigido para a descoberta de novos aleloquímicos, poucos são os estudos que avançam para o conhecimento do mecanismo de ação e a rota destes (FAROOQ et al., 2018), e assim, identificar os fatores, as enzimas e os genes envolvidos na síntese dos aleloquímicos (TREZZI et al., 2016).

REFERÊNCIAS

AGOSTINHO, F.H.; et al. The Effect of Cultivar on Critical Periods of Weed Control in Peanuts. **Peanut Science**, v. 33, p. 29-35, 2006.

ALCÂNTARA, E.N.; FERREIRA, M.M. Efeito de métodos de controle de plantas daninhas na produção de café durante 30 anos. In: Simpósio De Pesquisa Dos Cafés Do Brasil, 6., 2009, Vitória. **Anais**... Brasília, DF: Embrapa Café, 2009. 1 CD-ROM.

ALMEIDA, F.S. **Alelopatia e as plantas**. Londrina: IAPAR, Circular 53, 1988.

ALMEIDA, F.S. **Controle de plantas daninhas no plantio direto**. Londrina: IAPAR, Circular 67, 1991.

AMARAL, C.L. et al. Relações de interferência entre plantas daninhas e a cultura do grão-de-bico. **Bioscience Journal**, v. 31, p. 37-46, 2015.

AMARAL C.L. **Estudo fitoquímico de *Vernonia ferruginea*: abordagens alelopáticas e metabolômicas**. 147 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal). Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2017.

ARF, O. et al. Efeitos na cultura do trigo da rotação com milho e adubos verdes, na presença e na ausência de adubação nitrogenada. **Bragantia**, v. 58, p. 323-334, 1999.

ARIF, M. et al. Organic Weed Management in Wheat through Allelopathy. **International Journal of Agriculture & Biology**, v. 17, p. 127-134, 2015.

BALLARÉ, C.L. Light regulation of plant defense. **Annual Review Plant Biology**, v. 65, p. 335-363, 2014.

BARREIRO, A.P.; DELACHIAVE, M.E.A.; SOUZA, F.S. Efeito alelopático de extratos de parte aérea de barbatimão [*Stryphnodendron adstringens* (Mart.) Coville] na germinação e desenvolvimento da plântula de pepino. **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, v. 8, p. 4-8, 2005.

BARROSO, A.A.M.; YAMAUTI, M.S.; ALVES, P.L.C.A. Interferência entre espécies de planta daninha e duas cultivares de feijoeiro em duas épocas de semeadura. **Bragantia**, v. 69, p. 609-616, 2010.

BARROSO, A.A.M. et al. Efeito da densidade e da distância de caruru-de-mancha e amendoim-bravo na cultura do feijoeiro. **Planta Daninha**, v. 30, p. 47-53, 2012.

BERTHOLDSSON, N.O. Breeding spring wheat for improved allelopathic potential. **Weed Res**, v. 50, p. 49-57, 2010.

BETTIOL, W.; MORANDI, M.A.B. (Ed.). **Biocontrole de doenças de plantas.** Uso e

perspectivas. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2009.

BEZERRA, F.T. et al. Comportamento vegetativo e produtividade de girassol em função do arranjo espacial das plantas. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, p. 335-343, 2014.

BORGHI, E. et al. Influência da distribuição espacial do milho e da *Brachiaria brizantha* consorciados sobre a população de plantas daninhas em sistema plantio direto na palha. **Planta Daninha**, v. 26, p. 559-568, 2008.

BRESSANIN, F.N. et al. Interference periods of velvet bean in sugarcane. **Ciência Rural**, v. 46, p. 1329-1336, 2016.

BRESSANIN, F.N. et al. Influência da adubação nitrogenada sobre a interferência de plantas daninhas em feijoeiro. **Revista Ceres**, v. 60, p. 43-52, 2013.

BRIGHENTI, A.M.; BRIGHENTI, D.M. Controle de plantas daninhas em cultivos orgânicos de soja por meio de descarga elétrica. **Ciência Rural,** v. 39, p. 2315-2319, 2009.

CALEGARI, A. Espécies para cobertura de solo. In: DAROLT, M.R. (Org). **Plantio direto:** pequena propriedade sustentável. Londrina: Iapar, 1998. p.65-93.

CARVALHO, W.P. et al. Alelopatia de adubos verdes sobre feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris L.*). **Revista brasileira de Biociências**, v. 10, p. 93-86, 2012.

CASAL, J.J. Photoreceptor signaling networks in plant responses to shade. **Annual Review of Plant Biology**, v. 64, p. 403-427, 2013.

CHEMMA, Z.A.; ASIM, M.; KHALIQ, A. *Sorghum Allelopathy* for Weed Control in Cotton (*Gossypium arboreum* L.). I**nternational Journal of Agriculture & Biology**, v. 2, p. 37-40, 2000.

CHENG, F.; CHENG, Z. Research Progress on the use of Plant Allelopathy in Agriculture and the Physiological and Ecological Mechanisms of Allelopathy. **Front. Plant Sci.**, v. 6, 1020 p., 2015.

CHUNG, I.M. et al. Assesment of allelopathic potential of barnyard grass (*Echinochloa crus-gall*) on rice (*Oriza sativa L.*) cultivars. **Crop Protection**, v. 20, p. 928-921, 2001.

COELHO, R.A. et al. Influência do sombreamento sobre a população de plantas espontâneas em área cultivada com cafeeiro (*Coffea canephora*) sob manejo orgânico. **Agronomia**, Seropédica, v. 38, p. 23-28, 2004.

CZARNOTA, M.A.; RIMANDO, A.M.; WESTON, L.A. Evaluation of root exudates of seven Sorghum accessions. **Journal of Chemical Ecology**, v. 29, p. 2073-2083, 2003.

DAN, H.A. et al. Controle de plantas daninhas em sistemas de cultivo consorciados. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 11, p. 108-118, 2012.

DAYAN, F.E.; DUKE, S.O. Natural compounds as next-generation herbicides. **Plant Physiol.**, v. 166, p. 1090–1105, 2014.

DAYAN, F.E.; OWEN, D.K.; DUKE, S.O. Rationale for a natural products approach to herbicide discovery. **Pest Manag Sci.**, v. 68, p. 519–528, 2012.

DUARTE JÚNIOR, J.B.; COELHO, F.C.; FREITAS, S.P. Dinâmica de populações de plantas daninhas na cana-de-açúcar em sistema de plantio direto e convencional. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 30, p. 595-612, 2009.

DUKE, S.O. Proving Allelopathy in Crop–Weed Interactions. **Weed Science**, v. 63, p. 121-132, 2015.

DUKE, S.O. Why have no new herbicide modes of action appeared in recent years? **Pest Manag Sci.**, v. 68, p. 505–512, 2012.

DURIGAN, J. C.; ALMEIDA, F. S. **Noções sobre a alelopatia**. Jaboticabal: UNESP/FUNEP, 1993.

EINHELLIG, F.A. The physiology of allelochemical action: Clues and views. In: REIGOSA, M.; PEDROL, N. **Allelopathy from Molecules to Ecosystems**. Vigo: Universidade de Vigo, 2002. p.1-23.

EINHELLIG, F.A. Mechanisms and modes of action of allelochemicals. In: PUTNAM, A.R.; TANG, C. S. **The Science of Allelopathy**. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1986. p.171-188.

FAROOQ, N. et al. Allelopathy for Weed Management. In: MERILLON, J.M.; RAMAWAT, K. (Ed.) **Co-Evolution of Secondary Metabolites.** Reference Series in Phytochemistry. Springer, Cham, 2018.

FAY, P.K.; DUKE, W.B. An assessment of allelopathic potential in Avena germplasm. **Weed Science**, v. 5, p. 224-228, 1977.

FERRAZ, S.; LOPES, E.A.; AMORA, D.X. Controle de fitonematóides com o uso de extratos e óleos essenciais de plantas. In: POLTRONIERI, L.S.; ISHIDA, A.K.N. (Ed.). **Métodos alternativos de controle de insetos-praga, doenças e plantas daninhas**. Panorama atual e perspectivas na agricultura. Belém: EMBRAPA Amazônia Oriental, 2008. 308p.

FERREIRA, M.C.; SOUZA, J.R.P.; FARIA, T.J. Potenciação alelopática de extratos vegetais na germinação e no crescimento inicial de picão-preto e alface. **Ciência Agrotécnica**, v. 31, p. 1054-1060, 2007.

FRANKLIN, K.A.; WHITELAM, G.C. Phytochromes and shade-avoidance responses in plants. **Annals of Botany (Botanical Briefing)**, v. 96, p. 169-175, 2005.

GEALY, D.R.; YAN, W. Weed suppression potential of 'Rondo' and other Indica rice germplasm lines. **Weed Technol**., v. 26, p. 517–524, 2012.

GOMES JUNIOR, F.G.; CHRISTOFFOLETI, P.J. Biologia e manejo de plantas daninhas em áreas de plantio direto. **Planta Daninha,** v. 26, p. 789-798, 2008.

GONCHAR, A.I. Growing row crops with lupine on eroded soils. **Zemledelie**, v. 5, p. 50-53, 1961.

GUENZI, W.D.; MACCALLA, T.M. Phenolic acids in oat, wheat, sorghum, and corn residues and their phytotoxity. **Agronomy Journal**, v. 58, p. 303-304, 1966.

GUENZI, W.D.; MACCALLA, T.M.; NORSTADT, F.A. Presence and persistence of phytotoxic substance in wheat, oat, corn, and sorghum residues. **Agronomy Journal**, v. 59, p. 163-165, 1967.

HATZIOS, K.K. Biotechnology applications in weed management: now and in the future. **Adv Agron.**, v. 41, p. 325-375, 1987.

HE H. et al. Phytotoxic effects of volatile organic compounds in soil water taken from a *Eucalyptus urophylla* plantation. **Plant Soil,** v. 377, p. 203–215, 2014.

HIJANO, N. **Interferência de capim-camalote em cana-de-açúcar e seletividade de indaziflam e indaziflam + metribuzin aplicados em cana-de-açúcar no sistema MPB.** Dissertação. Jaboticabal: Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", 2016.

IGUE, K. et al. **Adubação Orgânica**. Londrina: Instituto Agronômico do Paraná (Informe da Pesquisa), 1984.

IKEDA, F.S. et al. Banco de sementes no solo em sistemas de cultivo lavoura pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, p. 1545 1551, 2007.

INDERJIT, K.M.M.; WESTON, L.A. Are Laboratory Bioassays for Allelopathy Suitable for Prediction of Field Responses?. **J Chem Ecol.**, v. 26, p. 2111–2118, 2000.

INTERNATIONAL ALLELOPATHY SOCIETY, 1996. International Allelopathy Society, I.A. 1996. First world congress on allelopathy. A science for the future. Disponível em: <http://allelopathy-society.osupytheas.fr/about/> Acesso em: 08 set. 2018.

JENSEN, K.; GUTEKUNST, K. Effects of litter on establishment of grassland plant species: the role of seed size and successional status. **Basic and Applied Ecology**, v. 4, p. 579–587, 2003.

KAZAN, K.; MANNERS, J.M. The interplay between light and jasmonate signalling during defence and development. **Journal of Experimental Botany,** v. 62, p. 4087-100, 2011.

KIM, H.W. et al. Changes in light quality alter physiological responses of soybean to thiamethoxam. **Planta,** v. 244, p. 639-650, 2016.

KUVA, M.A. et al. Períodos de interferência das plantas daninhas na cultura da cana-de-açúcar. II – Capim-braquiária (*Brachiaria decumbens*). **Planta Daninha**, v. 19, p. 323-330, 2001.

KUVA, M.A. et al. Período de interferência de plantas daninhas na cultura da cana-de-açúcar. III – capim-braquiária (*Brachiaria decumbens*) e capim-colonião (*Panicum maximum*). **Planta Daninha**, v. 21, p. 37-44, 2003.

KUVA, M.A. et al. Períodos de interferência das plantas daninhas na cultura da cana-de-açúcar. I – tiririca (*Cyperus rotundus*). **Planta Daninha**, v. 18, p. 241-251, 2000.

LORENCE, A.; NESSLER, E. Molecules of interest Camptothecin over four decades of surprising findings. **Phytochemistry**, v. 65, p. 2735-49, 2004.

MACÍAS, F.A.; MEJÍAS, F.J.; MOLINILLO, J.M. Recent advances in allelopathy for weed control: from knowledge to applications. **Pest. Manag. Sci.**, v. 75, p. 2413-2436, 2019.

MACÍAS, F.A. et al. Potential allelopathic sesquiterpene lactones from sunflower leaves. **Phytochemistry**, v. 43, p. 1205–1215, 1996.

MACÍAS, F.A. et al. Heliaespirone A: the first member of a novel family of bioactive sesquiterpenes. **Tetrahedron Letters**, v. 39, p. 427-430, 1998.

MACÍAS, F.A. et al. Allelopathy – a natural alternative for weed control. **Pest Management Science**, v. 63, p. 327–348, 2007.

MACIEL, C.D.G. Métodos de Controle de Plantas Daninhas. In: MONQUERO, P.A. (Coord.) **Aspectos da Biologia e Manejo de Plantas Daninhas**. São Carlos: Rima, 2014. p.129-144.

MANN, H.H. Field studies in green manuring. **Empire Journal of Experimental Agriculture**. v. 26, p. 274-282, 1958.

MASUM, S.M. et al. Allelopathic potential of indigenous Bangladeshi rice varieties. **Weed Biology and Management**, v. 16, p. 119-131, 2016.

MCKEE, R. 1947. **Lupines: new legumes for the south**. U.s. dep. Agric. Farmers bull. 1946. U.s.gov. Printing off., Washington, DC. 10 p. 1946.

MEAZZA, G. et al. The inhibitory activity of natural products on plant p-hydroxyphenylpyruvatedioxygenase. **Phytochemistry**, v. 60, p. 281-288, 2002.

MEDEIROS, A.R.M. Alelopatia – importância e suas aplicações. **Horti Sul**, v. 1, p. 27-32, 1990.

MEREB, E.L. **Morfofisiologia de tomateiros mutantes fotomorfogenético *fri*, *tri*, *phyb2* cultivados e condições de sol e sombra.** Dissertação. Universidade Federal de Goiás, 2017.

MERISTO. Titular do Registro: Syngenta Proteção de Cultivos Ltda. São Paulo: Syn-

genta, 2018. Bula de herbicida.

MEROTTO JUNIOR, A.; FISCHER, A.J.; VIDAL, R.A. Perspectives for using light quality knowledge as na advanced ecophysiological weed management tool. **Planta Daninha**, v. 27, p. 407-419, 2009.

MIYASKA, S.R.; INFORZATO, H.A.A.; MASCARENHAS, R.A.S. Elongation of the bean plant stem stimulated by the incorporation in the soil of vegetal matter of lupine plants (*Lupinus albus l.*). **Bragantia,** v. 26, p. 27-34, 1967.

MOREIRA, G.M. et al. Fitossociologia de plantas daninhas do cafezal consorciado com leguminosas. **Planta Daninha**, v. 31, p. 329-340, 2013.

MORENO, J.E. et al. Ecological modulation of plant defense via phytochrome control of jasmonate sensitivity. **Pnas/Plant Biology**, v. 106, p. 4935-4940, 2009.

NEPOMUCENO, M.P. et al. Chemical evidence for the effect of *Urochloa ruziziensis* on glyphosate-resistant soybeans. **Pest Management Science**, v. 73, p. 2071–2078, 2017.

NOZUE, K. et al. Shade avoidance components and pathways in adult plants revealed by phenotypic profiling. **Plos Genetics**, v. 11, p. 1-26, 2015.

OFFUTT, M.S. Registration of hope white lupine. **Crop Sci**, v. 11, 602 p, 1971.

OMORO, L.M.; PELLIKKA, P.K.E.; ROGERS, P.C. Tree species diversity, richness, and similarity between exotic and indigenous forests in the cloud forests of Eastern Arc Mountains, Taita Hills, Kenya. **Journal of Forest Research**, v. 21, p. 255–264, 2010.

OLIVEIRA, J.S. et al. Avaliação de extratos das espécies *Helianthus annuus*, *Brachiaria brizantha* e *Sorghum bicolor* com potencial alelopático para uso como herbicida natural. **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, v. 17, p. 379-384, 2015.

PACHECO, L.P. et al. Sobressemeadura da soja como técnica para supressão da emergência de plantas daninhas. **Planta Daninha**, v. 27, p. 455-463, 2009.

PARK, S.A.; BENJAMIN, R.L.; WATKINSON, A.R. The Theory and Application of Plant Competition Models: an Agronomic Perspective. **Ecology**, v. 82, p. 2525-2535, 2001.

PITELLI, R.A. Interferência das plantas daninhas nas culturas agrícolas. **Informe Agropecuário**, v. 11, p. 16-27, 1985.

PITELLI, R.A. Competição entre Plantas Daninhas e Plantas Cultivadas. In: MONQUERO, P.A. (Coord.) **Aspectos da Biologia e Manejo de Plantas Daninhas**. São Carlos: Rima, 2014. p.61-82.

PITELLI, R.A. Competição e controle das plantas daninhas em áreas agrícolas. **Série Técnica IPEF**, v. 4, p.1-24, 1987.

PITELLI, R.A.; DURIGAN, J.C. Terminologia para períodos de controle e convivência das plantas daninhas em culturas anuais e bianuais. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE HERBICIDAS E PLANTAS DANINHAS, 15., 1984, Belo Horizonte. **Resumos**... Belo Horizonte: SBHDE, 1984.

PIZA, C.S.T.; NEPOMUCENO, M.P.; ALVES, P.L.C.A. Period prior to interference of morningglory in sugarcane. **Científica**, v. 44, p. 543-548, 2016.

PRATES, H.T. et al. Efeito do extrato aquoso de leucena na germinação e no desenvolvimento do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 909-914, 2000.

REIGOSA, M.J.; SÁNCHEZ-MOREIRAS, A.; GONZÁLES, L. Ecophysiological approach in allelopathy. Critical Reviews in Plant Sciences, v. 18, p. 577-608, 1999.

RICE, E.L. **Allelopathy.** New York: Academic Press, 1984.

RIGOLI, R.P. et al. Habilidade competitiva relativa do trigo (*Triticum aestivum*) em convivência com azevém (*Lolium multiflorum*) ou nabo (*Raphanus raphanistrum*). **Planta Daninha**, v. 26, p. 93-100, 2008.

RIZVI, S.J.H. et al. 1,3,7- trimethylxanthine, a new chemosterilant for stored grain pest, *Callosobrochus chinensis* (L.). **Zeitschriftfür Angewandte Entomologie**, v. 90, p. 378–381, 1980.

RODRIGUES, L.R.A.; RODRIGUES, T.J.D.; REIS, R.A. **Alelopatia em plantas forrageiras**. Jaboticabal: UNESP/FUNEP, 1992.

ROSA, D.M. et al. Efeito dos extratos de tabaco, leucena e sabugueiro sobre a germinação de *Panicum maximum* Jaqc. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 5, p. 444-446, 2007.

ROSSI, I.H. et al. Interferência das plantas daninhas sobre algumas características agronômicas e a produtividade de sete cultivares de milho. **Planta Daninha**, v. 14, p. 134-148, 1996.

ROTUNDO, J.L.; AGUIAR, M.R. Litter effects on plant regeneration in arid lands: a complex balance between seed retention, seed longevity and soil-seed contact. **Journal of Ecology**, v. 93, p. 829–838, 2005.

SALGADO, T.P. et al. Efeitos da adubação fosfatada nas relações de interferência inicial entre plantas de milho (*Zea mays*) e de tiririca (*Cyperus rotundus*). **Planta Daninha,** v. 24, p. 37-44, 2006.

SANTI, A. et al. Adubação nitrogenada na aveia preta. I – influência na produção de matéria seca e ciclagem de nutrientes sob sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 27, p. 1075-1083, 2003.

SANTOS, P.L. et al. Utilização de extratos vegetais em proteção de plantas. Enciclopédia Biosfera, **Centro Científico Conhecer**. v. 9, p. 2562-2576, 2013.

SCHERER, L.M. et al. Efeito alelopático do extrato aquoso de folha e fruto de leucena (*Leucaena leucocephala Wit)* sobre a germinação e crescimento de raiz de canafístula (*Peltophorum dubium Spreng*.). **Semina: Ciências Agrárias**, v. 26, p. 161-166, 2005.

SCHOLTEN, R.; PARREIRA, M.C.; ALVES, P.L.C.A. Período anterior à interferência das plantas daninhas para a cultivar de feijoeiro 'Rubi' em função do espaçamento e da densidade de semeadura. **Acta Scientiarum**, v. 33, p. 313-320, 2011.

SEVERINO, F.J.; CARVALHO, S.J.P.; CHRISTOFFOLETI, P.J. Interferências mútuas entre a cultura do milho, espécies forrageiras e plantas daninhas em um sistema de consórcio. III – implicações sobre as plantas daninhas. **Planta Daninha**, v. 24, p. 53-60, 2006.

SILVA, B.P. et al. Phytotoxicity Study on Bidens *sulphurea Sch. Bi*p. as a Preliminary Approach for Weed Control. J**ournal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 65, p. 5161−5172, 2017.

SILVA, P.S.L. et al. Intercropping corn with a combination of tree species to control weeds. **Planta Daninha**. v. 33, p. 717-726, 2015.

SILVA, V.C. et al. Ocorrência de plantas daninhas em cultivo consorciado de café e nogueira-macadâmia. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, p. 441-449, 2013.

SOTTOMAYOR, M. et al. Peroxidases and the biosynthesis of terpenoidindole alkaloids in the medicinal plant *Catharanthus roseus* (l.)G.Don. **Phytochemistry Reviews**, v. 3, p. 159-71, 2004.

SOUZA FILHO, A.P.S. Alelopatia: princípios básicos e mecanismos de interferência. In: MONQUERO, PA (Coord.) **Aspectos da Biologia e Manejo de Plantas Daninhas**, São Carlos: Rima, 2014. p.83-101.

SOUZA FILHO, A.P.S.; ALVES, S.M. **Alelopatia em ecossistema de pastagem cultiva-**

da. Bélem: Embrapa-CPATU, 1998.

SOUZA FILHO, A.P.S.; ALVES, S.M. Mecanismo de liberação e comportamento de aleloquímicos no ambiente. In: SOUZA FILHO, A.P.S.; ALVES, S.M. **Alelopatia: Princípios Básicos e Aspectos Gerais**. Belém: EMBRAPA, 2002. p.111-154.

SOUZA FILHO, A.P.S.; RODRIGUES, L.R.A.; RODRIGUES, T.J.D. Potencial alelopático de forrageiras tropicais: efeitos sobre invasoras de pastagens. **Planta Daninha**, v. 15, p. 53-60, 1997.

SOUZA, L.S.; VELINI, E.D.; MAIOMONI-RODELLA, R.C.S. Efeito alelopático de plantas daninhas e concentrações de capim-braquiaria (*Brachiaria decumbens*) no desenvolvimento inicial de eucalipto (*Eucalyptu sgrandis*). **Planta Daninha**, v. 21, p. 343-354, 2003.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto Alegre: Artmed, 2009.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal.** 5.ed. Porto Alegre: Artmed, 2013.

TAVELLA, L.B. et al. Weed control in corn and weed sample size for growth evaluations. **Planta Daninha,** v. 32, p. 51-59, 2014.

TEIXEIRA, I.R. et al. Competição entre feijoeiros e plantas daninhas em função do tipo de crescimento dos cultivares. **Planta Daninha**, v. 27, p. 235-240, 2009.

TREZZI, M.M. et al. Allelopathy: driving mechanisms governing its activity in agriculture, **Journal of Plant Interactions**, v. 11:1, p. 53-60, 2016.

VIDAL, R.A. **Interação negativa entre plantas: inicialismo, alelopatia e competição**. Porto Alegre: Evangraf, 2010.

VIDAL, R.A. **Interações positivas entre plantas que aumentam a produtividade agrícola.** Porto Alegre: Evangraf. 2014.

VIDAL, R.A. et al. Initialism: a new term to describe the first mechanism of negative interaction between weeds and crops. Journal of Plant **Diseases and Protection**, v. 1, p. 1-2, 2008.

VIDAL, R.A. et al. Initialism as a mechanism of weed interference: can a crop plant be blinded? **Planta Daninha**. v. 30, p. 469-475, 2012.

VIZZOTTO, M.; KROLOW, A.C.; WEBER, G.E.B. Metabólitos secundários encontrados em plantas e sua importância. **Documento**: EMBRAPA Clima Temperado. v. 316, p. 7-15, 2010.

WILSON, J.B. Shoot competition and root competition. J**ournal Applied Ecology**, v. 25, p. 279–296, 1988.

WINK, M. Biochemistry and chemical ecology of lupine alkaloids. In: I.L.A. (Ed.) **Proceedings of the 3rd International Lupin Conference.** La Rochelle, 1984. p. 325-344.

WINK, M.; BVARDOWSKI, T. Allelochemical properties of alkaloids: Effect on plants, bacteria and protein biosyn-thesis. In: RIZVI, S.J.H.; RIZVI, V., (Ed.). **Allelopathy: basic and applied aspects**. London: Chapman and Hall, 1992. p.129-150.

WU, H. et al. Crop cultivars with allelopathic capability. **Weed Research**, v. 39, p. 171-180, 1999.

ZANINE, A.M.; SANTOS, E.M. Competição entre espécies de plantas – uma revisão. **Revista da FZVA**, v. 11, p. 10-30, 2004.

ZHANG, C.; FU, S. Allelopathic effects of leaf litter and live roots exudates of Eucalyptus species on crops. **Allelopathy Journal**, v. 26, p. 91–100, 2010.

CAPÍTULO 5

MÉTODOS DE CONTROLE DE PLANTAS DANINHAS

Leandro Paiola Albrecht[1]
Alfredo Junior Paiola Albrecht[1]
Maikon Tiago Yamada Danilussi[2]
Juliano Bortoluzzi Lorenzetti[2]

[1]Professor, Universidade Federal do Paraná – UFPR, [2]Doutorando em Agronomia, Universidade Federal do Paraná – UFPR.

1 INTRODUÇÃO

As plantas daninhas são motivo de reflexão e de extrema preocupação desde os primórdios da humanidade. Esse fato é tão claro e impactante, que foi registrado na história por várias culturas. Até mesmo alguns livros considerados sagrados por tradições religiosas abordam as plantas daninhas como um tipo de punição ou castigo aos seres humanos. Cita-se, como exemplo, o seguinte texto Bíblico: "... maldita é a terra por sua causa; com sofrimento você se alimentará dela todos os dias da sua vida. Ela lhe dará espinhos e plantas daninhas, e você terá que alimentar-se das plantas do campo. Com o suor do seu rosto você comerá o seu pão, até que volte à terra, ..." (GÊNESIS 3:17 a 19). Essa denotação é vívida não só em tradições como a judaica, a cristã ou a islâmica, ela remonta a todas as agregações humanas que depois se tornaram civilizações e antecederam a contemporaneidade. Em suma, a ideia é: as plantas daninhas trarão muito trabalho e nos serão um desafio à produção de alimentos.

As plantas daninhas criam desafios, aparentemente, cada vez maiores, mostrando sua grande adaptabilidade e agressividade. A matointerferência que as plantas daninhas podem ocasionar é absurda, não se limitando só à perda de rendimentos, mas à perda de qualidade dos materiais colhidos, assim como à depreciação no valor de terras infestadas. A título de exemplo, vamos pegar só uma das principais espécies daninhas considerada dramática para a agricultura brasileira, a buva (Conyza spp.). Pesquisas recentes (LORENZETTI, 2019) indicam que apenas uma planta de buva por metro quadrado, na média da lavoura de soja, até o final do ciclo, pode levar a perdas médias de até 14% na produtividade. Isso é extremamente preocupante, pois são perdas diretas para o agricultor, assim como podem refletir em bilhões na econômica de um país que estão sendo perdidos, como apontado por pesquisa na área (VASCONCELOS et al., 2012; ADEGAS et al., 2017; AGOSTINETTO et al., 2017).

Essas espécies daninhas exigem cada vez mais da ciência agronômica adequações e versatilidades na configuração de soluções para a resolução da problemática. Em uma das fases da "revolução verde", surgiram os herbicidas, ferramenta no controle químico de plantas daninhas que contribuíram positivamente no manejo destas pestes dentro do conjunto de manejos fitossanitários. No entanto, o abu-

so dessa opção mostrou-se tenebroso, pois os crescentes e abundantes relatos de plantas daninhas resistentes a herbicidas estão aí para provar nossos erros de manejo (AGOSTINETTO; VARGAS, 2014; ALBRECHT et al., 2013; CHRISTOFFOLETI et al., 2016; ALBRECHT et al., 2018; QUEIROZ et al., 2019; ALBRECHT et al., 2020; HEAP, 2020). Nesse sentido, o Manejo Integrado de Plantas Daninhas (MIPD) é uma necessidade, assim como foi primeiramente vislumbrado para a questão de pragas pelo MIP (Manejo Integrado de Pragas).

O Manejo Integrado de Plantas Daninhas é a combinação de forma racional de medidas preventivas, com medidas de controle e de erradicação, se necessárias, em determinado agroecossistema. O controle refere-se as medidas específicas para minimizar a competição das plantas daninhas, ou seja, para que a presença das plantas daninhas não cause dano econômico nos diversos cultivos. Dentre as medidas, tem-se uma separação didática para fins elucidativos, que segue: medidas preventivas e de erradicação; medidas culturais; métodos mecânicos e físicos; métodos biológicos, e métodos químicos, que podem ser tidos como os controles possíveis de plantas daninhas dentro de um conjunto de estratégias integradas.

Com o objetivo de abordar de forma breve e direta as possibilidades de controle dentro do MIPD, foi dado ênfase aos aspectos primordiais e relevantes de cada prática, usando a linguagem corrente e conceitos embasados na literatura pertinente da área de Ciência das Plantas Daninhas. As referências que serviram como fundamento, subsidiando as colocações e reflexões na sequência dos tópicos a serem discorridos, foram: Monaco et al. (2002); Silva e Silva (2007); Zimdahl (2007); Constantin (2011); Oliveira et al. (2011); Carvalho (2013); Guimarães et al. (2018) e Oliveira e Brighenti (2018). Assim, para complementar esse capítulo e mesmo esse livro, as literaturas supramencionadas são indicadas para leitura.

2 PREVENÇÃO E ERRADICAÇÃO

A prevenção e a erradicação, em um sentido profilático, seriam as práticas mais próximas do ideal, dentro de um manejo fitossanitário, com economicidade. As medidas preventivas referem-se à adoção de medidas que impeçam ou minimizem a introdução e a disseminação de plantas daninhas em determinado local; e, em mui-

tos casos, estão ligadas a atitudes institucionais ou governamentais. Este local pode ser uma propriedade, um município, um estado e até mesmo o País, portanto.

É válido ressaltar que muitas espécies de plantas daninhas presentes no Brasil foram introduzidas de outros países, como *Cyperus rotondus* L., *Cynodon dactylon* (L.) Pers. *Urochloa decumbens* (Stapf) R.D.Webster. Dentre muitas outras, essas naturalizam-se e atualmente são responsáveis por interferir, consideravelmente, em muitos ambientes produtivos, nos mais diferentes cultivos agronômicos e em outras atividades humanas (como é o caso de represas, trilhos de trem, beiras de estradas, pátios de empresas, jardins, etc.). Desse modo, fica claro o impacto que a falha na adoção de métodos preventivos teve sobre a ocorrência das muitas espécies de plantas daninhas atualmente problemáticas e que implicam milhões, senão bilhões de dólares de prejuízo a nações como o Brasil.

Assim como na área de saúde humana, a agricultura deve valer-se do princípio da precaução; e como na medicina, há a parte preventiva, e a agropecuária deve estar atenta a esses elementos para que sejam evitadas medidas paliativas de controle. As medidas de prevenção têm, como princípio óbvio, a precaução. Portanto, os impactos de sua adoção podem ser observados apenas a médio e longo prazos, o que acaba contribuindo para que, muitas vezes, sua adoção seja negligenciada em algumas situações. Por esse motivo, no Brasil, a preocupação com a defesa fitossanitária foi regulamentada em 1934, com o Decreto n. 24.114, que aprovou o "Regulamento de Defesa Sanitária Vegetal" e ainda em vigor (BRASIL, 1934). No entanto, atualizações e novas medidas são sempre imprescindíveis.

Desse modo, muitas vezes, as medidas preventivas estão associadas a uma regulamentação normativa, já que a obrigatoriedade legal e a fiscalização fazem com que se adote, efetivamente, a medida preventiva de controle. Assim, no Brasil, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) realiza essas normatizações visando ao controle oficial de algumas plantas daninhas.

Assumindo como exemplo basilar, a Instrução Normativa n. 45, de 22 de agosto de 2018 (BRASIL, 2018), define no artigo segundo:

I - Praga Quarentenária Ausente - PQA: praga de importância econômica potencial para uma área em perigo, que não esteja presente no território nacional;

II - Praga Quarentenária Presente - PQP: praga de importância econômica potencial para uma área em perigo, presente no País, porém não amplamente distri-

buída e que se encontra sob controle oficial;

III - Praga Não Quarentenária Regulamentada - PNQR: praga não quarentenária cuja presença em plantas para plantar, afeta o uso proposto dessas plantas, com impacto econômico inaceitável e que esteja regulamentada dentro do território da parte contratante importadora.

Para as "plantas infestantes e parasitas", conforme a Instrução Normativa n. 38, de 1° de outubro de 2018 (BRASIL, 2018; BRASIL, 2008), estabelece o seguinte:

Pragas quarentenárias ausentes (PQA): *Alopecurus myosuroides Huds.; Amaranthus albus*; *Amaranthus blitoides; Amaranthus graecizans; Apera spica-venti; Arceuthobium spp.; Arctotheca calêndula; Asphodelus tenuifolius; Bonnaya antipoda (Lindernia antipoda; Bonnaya ciliata (Lindernia ciliata); Brassica tournefortii; Bromus rigidus; Carduus acanthoides; Carduus pycnocephalus; Centaurea difusa; Chondrilla juncea*; *Cirsium arvense; Cleome viscosa; Crassocephalum crepidioides; Cuscuta australis; Cuscuta campestris; Cuscuta epithymum; Cuscuta europaea; Cuscuta reflexa; Descurainia pinnata; Descurainia sophia; Elymus repens (Agropyron repens); Euphorbia esula*; *Euphorbia helioscopia; Fumaria bastardii; Fumaria densiflora*; *Fumaria muralis; Galeopsis speciosa*; *Heliotropium europaeum; Hibiscus trionum; Hirschfeldia incana; Hordeum murinum subsp. leporinum (Hordeum leporium); Imperata cylindrica; Kochia scoparia*; *Lepidium draba (Cardaria draba); Leptochloa chinensis*; *Lindernia procumbens; Lolium rigidum*; *Ludwigia adscendens*; *Melochia corchorifolia*; *Monochoria vaginalis*; *Myagrum perfoliatum*; *Orobanche spp.*; *Persicaria barbata (Polygonum barbatum); Persicaria nepalensis (Polygonum nepalense); Phalaris paradoxa*; *Pilosella officinarum (Hieracium pilosella); Rhaponticum repens (Acroptilon repens); Rumex hypogaeus (Emex australis)*; *Salsola kali (Salsola tragus)*; *Senecio vulgaris*; *Setaria pumila*; *Sisymbrium loeselii*; *Sisymbrium orientale; Solanum rostratum; Sonchus arvensis*; *Sphenoclea zeylanica; Stachytarpheta jamaicensis*; *Striga spp.*; *Taeniatherum caput-medusae*; *Urochloa glumaris (Brachiaria paspaloides), e Vulpia ciliata.*

Pragas Quarentenárias Presentes (PQP): *Amaranthus palmeri* em Algodão (*Gossypium sp.*), Soja (*Glycine max*) e Milho (*Zea mays*) em Mato Grosso.

Muitas são as plantas daninhas quarentenárias ausentes no Brasil e que devem ficar distantes de nossos cultivos, devido aos enormes prejuízos potenciais, devido à agressividade dessas espécies e sua complexidade de controle efetivo.

Como exemplos de PQA tem-se a espécie *Euphorbia esula*, que é uma planta perene nativa da Europa e Ásia, que causa sérios danos aos agricultores dos EUA, e estima-se um impacto econômico total anual de US $ 58.4 milhões (BANGSUND et al., 1999). Já Wall e Friesen (1990) descrevem a *Setaria viridis* como competidora com a cultura da batata no Canadá, sendo que o aumento da densidade desta planta daninha reduz o número e o tamanho dos tubérculos, com maior potencial de competição em safras com períodos secos.

Infelizmente no Brasil, há diagnóstico de plantas daninhas quarentenárias presentes, o que clama a preocupações e leva a ações imediatas do MAPA e de demais agentes. Gazziero e Silva (2017) relatam que a planta *Amaranthus palmeri*, hoje considerada PQP, conhecida como caruru-palmeri, foi detectada em 2015, no Estado do Mato Grosso. Salientam ainda como uma planta agressiva, com grande capacidade de adaptação em diferentes ambientes e grande produção de sementes, além de ser de difícil controle.

Uma das principais formas de introdução e de disseminação de plantas daninhas é por meio do uso de sementes e de mudas não certificadas. Por isso, a Instrução Normativa n° 46, de 24 de setembro de 2013 (BRASIL, 2013), estabelece a relação e as espécies de sementes nocivas toleradas e proibidas na produção, na comercialização e no transporte de sementes nacionais e importadas, como a seguir:

Sementes nocivas toleradas: *Acanthospermum australe* (Loefl.) Kuntze; *Acanthospermum hispidum* DC.; *Aeschynomene rudis* Benth.; *Amaranthus spp.*; *Ambrosia artemisiifolia* L.; *Ambrosia artemisiifolia* L.; *Ammi majus* L.; Ammi *visnaga* (L.) Lam., *Anthemis cotula* L.; *Artemisia vulgaris* L.; *Avena barbata* Pott ex Link; *Avena fatua* L.; *Bidens pilosa* L.; *Bidens subalternans* DC.; *Urochloa plantaginea* (Link) R.D.Webster; *Brassica nigra* (L.) W.D.J *Koch; Brassica rapa* L. var. *campestris*; *Cardiospermum halicacabum* L.; *Cenchrus echinatus* L.; *Centaurea melitensis* L.; *Centaurea solstitialis* L.; *Chenopodium* spp.; *Cirsium vulgare* (Savi) Ten.; *Commelina* spp.; *Conyza bonariensis* (L) Cronquist; *Convolvulus arvensis* L.; *Croton glandulosus* L.; *Croton glandulosus* L.; *Croton lundianus* (F.Diedricgsen.) Muell.Arg; *Cyperus spp.*; *Datura stramonium* L.; *Digitaria insularis* (L.) Mez ex Ekman; *Diodia teres* Walt.; *Echinochloa colona* (L.) Link.; *Echinochloa crus-galli* (L.) P.Beauv.; *Echium plantagineum* L.; *Euphorbia heterophylla* L.; *Fallopia convolvulus* (L.) Á.Löve; *Galium aparine* L.; *Herbetia pulchella* Sweet; *Hyptis suaveolens* (L.) Poit.; *Indigofera hirsuta* L.; *Ipomoea spp.*; *Merremia cissoides* (Lam.) Hall.

F.; *Pennisetum setosum* (Sw.) L.Rich.; *Persicaria spp*.; *Picris echioides* L.; *Piptochaetium bicolor* (Vahl.) Desv.; *Piptochaetium montevidense*; Plantago spp.; *Polygonum aviculares* L.; *Polygonum arenastrum* Boreau; *Raphanus raphanistrum* L.; Rumex spp.; *Senecio brasiliensis* Less.; *Senna obtusifolia* (L.) H.S. Irwin&Barneby; *Senna occidentalis* (L.) Link; *Sida spp*.; *Silene gallica* L.; *Silybum marianum* (L.) Gaertn.; *Sinapis arvensis* L.; Solanum spp.; *Spergula arvensis* L.; *Spermacoce alata* Aubl.; *Stelaria media* (L.) Vill.; *Torilis nodosa* (L.) Gaertn. e *Xanthium* spp.

Sementes nocivas proibidas: *Cuscuta spp*.; *Cyperus rotundus* L.; *Eragrotis plana* Nees; *Hippobroma longiflora* (L.) G.Deon; *Rottboelia exaltata* L.; *Rumex acetosella* L.; *Sorghum halepense* (L.) Pers.; *Wedelia glauca* (Ortega) O.Hoffm. ex Hicken.

A utilização de sementes certificadas, nesse conjunto de prevenção, é primordial nos sistemas produtivos, pois além de garantir a qualidade fisiológica das sementes, também se evita a introdução e a disseminação de plantas daninhas nas áreas, por meio de sementes ou de outros propágulos (como rizomas, tubérculos, bulbos, etc.). Desse modo, atenção especial deve ser dada ao combate de sementes denominadas de piratas ou sem certificação, para que problemas não sejam disseminados ou piorados.

Contudo, as medidas preventivas vão muito além de aspectos legais. Dentre as várias outras práticas que devem ser adotadas, destacam-se:

- Limpar os equipamentos de preparo de solo e as colhedoras: grades, arados, subsoladores, dentre outros implementos/equipamentos em locais infestados com plantas daninhas, precisam ser devidamente limpos após o uso, evitando-se a disseminação de sementes e de propágulos para outras áreas de cultivo. Apesar de ser uma prática relativamente simples, o tempo relativamente curto e questões operacionais criam empecilhos para que os produtores coloquem em prática tais atividades importantes.

- Utilizar esterco fermentado (compostagem, principalmente em sistema de produção orgânico), pois a passagem pelo trato intestinal dos animais não garante a perda da viabilidade das sementes de plantas daninhas; portanto, a fermentação completa é necessária (ação de microrganismos e temperatura). No processo de fermentação, requer-se que a temperatura seja de 50-65°C para uma satisfatória ação sobre a viabilidade das sementes e de outros dissemínulos de plantas daninhas (CONSTANTIN, 2011). Além do esterco fermentado, em muitas áreas é utilizada

a torta de filtro, meio extremamente importante como fonte de disseminação de plantas daninhas na cultura da cana-de-açúcar.

- Manter livre de plantas daninhas os canais de irrigação e outras áreas próximas à propriedade. Limpar ou eliminar plantas daninhas no entorno de carreadores e de estradas.

- Controle na entressafra: essa prática visa a diminuir o recarregamento do banco de sementes. No controle de entressafra, entre as diversas práticas que serão discutidas a seguir, estão a serviço de evitar ou de eliminar no pousio as plantas daninhas. Essas atividades, muitas vezes, são denominadas de "manejo outonal" ou "manejo de entressafra" ou, ainda, "manejo antecipado", e em grandes culturas é feito comumente o uso de aplicações sequenciais ou não de herbicidas.

- Sistema adequado de rotação de culturas. Prática milenar e elementar, que será melhor abordado dentro do controle na cultura.

Observa-se, ainda, que em termos de prevenção e de eliminação, há as sementes tóxicas, conforme previsto em instruções normativas, como a 29, de 8 de junho de 2011, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) (BRASIL, 2011), complementada por outras posteriores do próprio MAPA e orientações de empresas e de associações, como a Aprosoja (Informe Técnico 111/2016), que alertam e preveem a questão de sementes tóxicas. Entre as sementes tóxicas, estão sementes de espécies consideradas tipicamente como daninhas nas lavouras, como é o caso da mamona (*Ricinus communis*) e do fedegoso (*Senna occidentalis*). Essas sementes, consideradas tóxicas, podem condenar lotes de grãos para comercialização/exportação, por possuírem potencial de toxicidade na alimentação humana ou animal, sendo essa determinação realizada por órgãos públicos (como o MAPA) ou por agentes privados interessados diretamente na comercialização/exportação do produto. Nesse sentido, o manejo de plantas daninhas, que inclua a erradicação e a prevenção é necessário para evitar essas espécies em lavouras que serão colhidas e armazenadas para comercialização. Caso cheguem ao sistema de recebimento e de armazenagem, devem ser eliminadas por processos de limpeza efetiva.

Ainda no tocante à erradicação, é importante recordar as práticas de eliminação de propágulos, referidas muitas vezes como esterilização, expurgo, solarização, desinfecção, etc. Essas atividades acabam sendo mais utilizadas em pequenas áreas, casas de vegetação, hortas, viveiros e experimentação agrícola, como aquelas

que fazem uso de substratos para produção.

3 CONTROLE CULTURAL

O controle cultural, ou controles culturais (pois há uma pluralidade de possibilidades), visa, mais do que outros métodos, a garantir condições competitivas para a cultura-foco. Mas do que em outros controles também, o cultural abarca o entendimento dos períodos de interferência ou matointerferência.

A título de reportar a uma nomenclatura usual no Brasil, citam-se os seguintes períodos: PAI (período anterior à interferência), PTPI (período total de prevenção à interferência), e PCPI (período crítico de prevenção à interferência). Nota-se que o PCPI é fruto da diferença entre o PAI e o PTPI, e que as práticas culturais aqui tratadas (com a finalidade de exemplificar e não esgotar o assunto) priorizam, por assim dizer, aumentar o PAI ou diminuir o PTPI, o que leva, por decorrência, à diminuição do PCPI, e, portanto, à diminuição ou à eliminação de intervenções dentro da cultura. Pois como observa Constantin (2011) o melhor controle para a planta daninhas é a própria cultura.

No entanto, para melhor esclarecer, é necessário responder: como o melhor controle para as plantas daninhas é a própria cultura? É a própria cultura, desde que ela cresça ou feche a entrelinha "no limpo", sem daninhas, ou com baixa pressão/infestação. E como é possível isso? Dando condições competitivas para a cultura. E como dar condições competitivas para a cultura? Fornecendo ou atendendo ao máximo possível seus fatores de produção em termos ecofisiológicos, ou seja, diminuindo o estresse sobre a cultura, para que ela tenha seu desenvolvimento pleno. E não só isso, eliminando ou suprimindo as plantas daninhas previamente existentes na área (ALBRECHT; ALBRECHT, 2020).

Como é possível exemplificar o supramencionado? Podemos realizar um bom controle químico, com herbicidas em dessecação pré-semeadura e com o uso de pré-emergentes, garantindo uma dianteira no crescimento para a cultura, ou seja, controlando plantas adultas e segurando banco de sementes, e, portanto, aumentando o PAI ("que tem mais a ver com a planta daninha). Mas como fazer isso pelo controle da cultura? Por exemplo, manejando a entressafra com cultivos de cobertu-

ra de solo, aumentado a palha em superfície, criando uma barreira física para a germinação de espécies daninhas ou liberando aleloquímicos que inibem essas plantas daninhas (crescidas ou em germinação). Fazendo isso, diminuem-se a infestação e a importância das plantas daninhas em termos fitossociológicos, e, assim, prolonga-se o PAI.

Nesse sentido, como modular o PTPI? Em termos de controle cultural, o PTPI pode ser diminuído (o que é desejável) quando favorecemos, por exemplo, o fechamento das entrelinhas em um cultivo anual. Como favorecer o "fechamento da cultura"? Dando condições para que a cultura se desenvolva adequadamente, semeando cultivares conforme o zoneamento agroclimático, respeitando o arranjo espacial apropriado, corrigindo o perfil do solo, adubando conforme as exigências da cultura, etc. Tudo que diminua o estressa abiótico e biótico a cultura, diminui o PTPI (pois ele "tem a ver mais com a cultura") e mitiga o estresse biótico por plantas daninhas.

Em termos sintéticos, todo controle cultural, ou não, que diminua as plantas daninhas na área ou o seu banco de sementes, prolonga o PAI. E toda prática que favoreça a cultura, seu potencial e desenvolvimento, diminui o PTPI. Só quando essas duas premissas forem alcançadas, há diminuição do PCPI ou supressão dele. Nesse interim, todas as Boas Práticas Agrícolas são bem-vindas. A seguir serão ilustradas algumas possibilidades:

Seleção de genótipos: como a cultura é o alvo no qual se objetiva ter melhor desenvolvimento para maior produtividade, a escolha de suas cultivares devem seguir alguns critérios, quando pensamos em MIPD. As cultivares necessitam ser adaptadas à região, aumentando o poder competitivo e ter um rápido desenvolvimento inicial, com produção rápida de novos ramos e maior densidade foliar. Normalmente, cultivares com ciclos mais precoces possuem esta característica, fazendo um ligeiro "fechamento de entrelinhas", e sombreando o solo de maneira que diminuem a emergência das plantas daninhas (ZANON et al., 2015). O uso de cultivos transgênicos entra nessa opção, pois eles podem potencializar o desenvolvimento da cultura ou, mesmo, fornecer genótipos tolerantes a herbicidas, assim associando o controle cultural (com aspectos mais genéticos), ao controle químico.

Arranjo espacial e zoneamento agroclimático (Espaçamento, densidade e época de plantio ou semeadura): para tal prática, devem-se conhecer bem a espécie

cultivada, sua morfologia e fisiologia, as espécies de plantas daninhas presentes na área e seus comportamentos climáticos e o clima da região. Quando se utiliza um espaçamento de entrelinhas menores e maior densidade populacional, contribui-se para a redução da interferência das plantas daninhas na cultura; pois, com esses manejos, a cultura irá aumentar o potencial competitivo da cultura, realizando maior sombreamento no solo (PELLIZZARO et al., 2019), dificultando a emergência e a sobrevivência das plantas daninhas, daquelas que são sensíveis ao sombreamento. Da mesma forma, o plantio ou a semeadura no período correto fará com que a cultura tenha melhor desenvolvimento, tornando-a mais competitiva. É possível, também, a antecipação do plantio ou da semeadura (ALBRECHT et al., 2008), ante a emergência das plantas daninhas, fornecendo uma dianteira no crescimento da cultura em relação à espécie infestante, com potencial de sombreando às mesmas logo no período inicial de seu desenvolvimento. Porém, para esse conjunto de práticas, deve ser atentado para a competição entre as plantas da própria cultura, ou competição intraespecífica, que deve ser evitada, procurando o melhor ajuste espacial.

Sistema produtivo: cada cultura possui sua particularidade, e estas características podem fazer com que algumas espécies de plantas daninhas não se desenvolvam juntamente com a cultura que está sendo utilizada na área; porém, algumas outras espécies possuem os mesmo hábitos e exigências, favorecendo que estas plantas daninhas se estabeleçam na área. Quando uma única cultura é aplicada na mesma área por vários anos seguidos, tende-se a empregar os mesmos manejos culturais, aumentando consideravelmente os problemas de plantas daninhas. Isso ocorre em termos macros, pela simplificação do sistema, ou específico, por pressão de seleção continuada com o uso dos mesmos herbicidas.

Nesses termos, entra a rotação de culturas, com distintas espécies na mesma área, complexando mais o sistema e mudando a flora cultivada e de plantas daninhas. Assim, propicia o uso de mais herbicidas, permitindo a rotação de mecanismos de ação.

Para que a rotação de culturas seja efetiva, faz-se necessário o uso de culturas competitivas, com potenciais alelopáticas (que liberam aleloquímicos), com distintos hábitos de crescimento e que forneçam boa cobertura de solo, entre outras características favoráveis ao sistema. Desta forma, poderão ser inseridas no sistema culturas que possuem características de adubação verde, ou cobertura verde.

Pois essas têm as características de manter o solo coberto na entressafra, com uma cobertura uniforme, que recicla nutrientes no solo, aumenta a matéria orgânica no solo, melhora as condições físico-químicas e biológicas do solo, melhorando o perfil do mesmo para o cultivo (ALBRECHT et al., 2018). Essa cobertura poderá, inclusive, impedir o desenvolvimento de plantas daninhas durante a entressafra, onde o solo estaria "desprotegido" em pousio, trazendo uma barreira para o banco de sementes no solo.

Alelopatia: os efeitos alelopáticos foram desenvolvidos pelas plantas superiores com a capacidade de sintetizar, acumular e secretar uma variedade de metabólitos secundários, que, diferentemente do metabolismo primário, esses aleloquímicos estão relacionados com mecanismos e/ou estratégias químicas de adaptação às condições ambientas. Tais condições podem ser para impedir que outras plantas se desenvolvam ao seu redor, competindo por água, luz, espaço e outros. Essas substâncias alelopáticas podem ser liberadas ao ambiente de diversas formas, diferindo de planta para planta ou até mesmo em diferentes tecidos, podendo ser liberadas por exsudação radicular, volatilização, lixiviação e decomposição de folhas ou outros tecidos, quando em contato com o solo, pela ação climática e por microrganismos. Assim, algumas espécies irão liberar seus compostos quando vivas, outras quando mortas, e podendo ocorrer em ambas (FERREIRA; AQUILA, 2000; REICHE et al., 2013; NUNES et al., 2014). Então, a escolha de uma cultura com efeito alelopático sobre as plantas daninhas pode ser avaliada em um planejamento do sistema.

Nutrição: ambientes com distintas fertilidades, naturalmente, selecionam flora. Em cultivos, o foco deve ser o de atender à demanda nutricional, entre outras características de fertilidade do solo. A planta cultivada, sendo bem nutrida, tem suas habilidades competitivas potencializadas, podendo crescer mais rápido e vencer no sistema. Estudos de demanda nutricional entre espécies propiciam uma evidência dessa realidade (NOLLA et al., 2018).

Portanto, dentro de uma lógica de sistema produtivo, a estratégia cultural, em suas diferentes vertentes (como anteriormente exposto), é provavelmente a melhor forma de controle de plantas daninhas. A literatura, em seus diferentes prismas e inserções, corrobora essa posição cultural, pensando em sistema, como extremamente válida (FERREIRA; AQUILA, 2000; GAZZIERO et al., 2004; CASTRO et al., 2011; CONSTANTIN, 2011; SILVA, 2012; LAMEGO et al., 2013; ALBRECHT

et al., 2018; ALBRECHT; ALBRECHT, 2020).

4 CONTROLES MANUAIS E MECÂNICOS

Esses métodos possuem como base o uso de algum instrumento de corte ou arranque à planta daninha do local, podendo-se dizer que são os métodos mais antigos e até primitivos de controle. Dentre eles, destacam-se:

Monda: consiste em retirar com a mão (catação manual) as plantas daninhas, sendo uma prática utilizada em jardins, na agricultura de subsistência ou familiar e em situações específicas, pois é uma prática com baixo rendimento operacional e com alto custo.

Capina Manual: evolução da monda, que tem o objetivo de cortar ou arrancar as plantas daninhas da área com alguns instrumentos, como a enxada, com maior rendimento operacional comparada à monda. Possui alto custo, baixo rendimento operacional e é o controle mais utilizado em áreas com restrição ao uso de herbicidas, na forma complementar ao controle cultural ou em outro. Pode ser utilizado como método adicional de controle das plantas daninhas, mesmo em cultivos com uso de herbicida, como vem sendo muito utilizado nos últimos anos, no "repasse" ou na "catação" de plantas daninhas que sobreviveram aos herbicidas, ou que caracterizam escape, por ser uma população resistente a herbicidas.

Roçada manual: prática utilizada, principalmente, com foice, em pomares ou em pastagens, ou mesmo em cultivos agroecológicos, a fim de diminuir ou retardar o crescimento das plantas daninhas nessas culturas, para que diminua a competição entre as plantas. Essa prática possui limitações semelhantes às demais atividades manuais apresentadas anteriormente.

Métodos mecânicos: todas as técnicas que visam ao controle de planta daninha com um implemento, que são tracionadas por animais ou tratores, que se entendem como um progresso mecânico das atividades manuais. Esses equipamentos e implementos podem, não somente ter o objetivo de controlar as plantas daninhas, como também o de revolvimento do solo, podendo ser dividido entre os implementos com baixo revolvimento do solo (roçadeiras, rolo-faca, enxada-rotativa, etc.) e com alto revolvimento do solo (grade, arado de disco, arado de aiveca, subsoladores,

etc.). Essa modalidade de controle vem avançando juntamente com o avanço da robótica e da inteligência artificial, podendo trazer altos benefícios no futuro, pela precisão.

Essas práticas mecânicas podem ser divididas conforme o ciclo da cultura em: primário: operação inicial de preparo de solo realizada antes do plantio da cultura: aração, escarificação, etc. Ou secundário, que é o preparo inicial do solo com grade. E ainda o seletivo: que é realizado para eliminar as plantas daninhas, depois do plantio, após a emergência da cultura e das plantas daninhas, por meio de cultivadores, enxadas rotativas e grades leves. O seletivo deve ser realizado quando as plantas estão em estádio inicial de desenvolvimento (plântulas). A roçadeira é utilizada em culturas perenes (café, cítrus, eucalipto, pínus, frutíferas, etc.). E há ainda a amontoa, como feita no amendoim, que pode trazer como benefício secundário o controle de plantas daninhas.

O sucesso do controle mecânico depende da semelhança da planta daninha com a cultura, da germinação da planta daninha, da presença de plantas daninhas perenes, do espaçamento da cultura e do banco de sementes. Porém, essas práticas podem trazer algumas desvantagens como: compactação de solo logo abaixo da superfície movimentada, exposição do solo à erosão, perda de umidade por evaporação, quebra de dormência de sementes e outros órgãos de propagação vegetativa.

Na atualidade, em função dos relatos de resistência de plantas daninhas a herbicidas, e da concomitante perda de eficiência do controle químico, vem sendo aberto grande espaço para o controle mecânico. O grande drama é que, em muitos casos, os benefícios são muito questionáveis. Por exemplo, uma boa mecanização com revolvimento da área pode eliminar as plantas daninhas adultas e permitir o bom uso de um pré-emergente, mas podem ser incalculáveis os prejuízos trazidos ao sistema, em função da perda de cobertura de solo e possíveis erosões, além da perda de matéria orgânica. No entanto, algumas opções, como a roçada complementar ao controle químico, vêm mostrando-se promissoras. Como em espécies como o capim-amargoso (*Digitaria insulares*), em que uma roçada (controle mecânico) permite o esgotamento de reservas do rizoma, sendo a rebrota controlada por herbicidas (controle químico). É possível aqui, como no cultural, observar a nítida intersecção necessária entre os controles dentro no MIPD.

5 CONTROLE FÍSICO

O método físico baseia-se em controle das plantas daninhas a partir de práticas que exerçam a influência física sobre as plantas daninhas. Destacam-se entre as práticas:

Inundação: prática que utiliza a água para controle de plantas daninhas terrestres, como o do arroz irrigado, que permite ter um ótimo controle de plantas daninhas de difícil controle, como é o arroz-vermelho (CONSTANTIN, 2011). Porém, para este manejo, são necessários grande quantidade de água e cuidados especiais em áreas novas.

Controle térmico: controle de plantas daninhas por altas temperaturas em ambientes aquáticos, utilizado principalmente em reservatórios de água. Essa técnica é utilizada em manejos complementares a outros, principalmente ao controle mecânico. Utiliza-se lança-chamas para elevar a morte foliar, mas o controle eficiente da planta irá depender de uma série de fatores, principalmente o tempo de exposição do calor na planta.

Solarização: consiste em uma técnica com a cobertura do solo com filme de polietileno, devendo ser realizada nos meses mais quentes do ano, e dessa forma irá causar o aumento da temperatura. Em solo com umidade, essa temperatura inicial poderá fazer com que o banco de sementes de plantas daninhas germine, e após a alta temperatura mata a planta. Este controle é caro e inviável em grandes propriedades, porém é muito utilizado em pequenas produções de hortaliças e na produção de mudas, pois é altamente eficiente, conseguindo atingir altas temperaturas em até 5cm de profundidade do solo.

Cobertura morta: esta técnica está associada ao controle cultural, e pode consistir em ter uma cobertura do solo com restos vegetais, podendo ser utilizados diversos materiais. Um grande exemplo é o plantio direto, onde se mantêm os restos culturais sobre o solo, formando uma cobertura. Essa cobertura morta pode ser dividida em três principais efeitos: físico, microbiológico e alelopático. O efeito físico impede a passagem de luz para o solo, impedindo a germinação das sementes fotoblásticas positivas, enquanto as sementes que não necessitam de luz para sua emergência, irão ter maior gasto energético para romper essa camada. O efeito microbiológico irá alterar as condições do solo, melhorando as condições da biologia

do solo, podendo deteriorar algumas sementes de plantas daninhas. E no efeito alelopático, assim como nas medidas culturais, alguns restos vegetais podem liberar em sua decomposição, fazendo a supressão do crescimento das plantas daninhas ou, até mesmo, fazendo o controle delas.

Eletricidade (eletrocussão): esta técnica baseia-se na descarga elétrica que vem de um equipamento, manual ou tracionada por trator, que eletrocuta as plantas daninhas através do contato direto dos eletrodos aplicadores com a planta. Este contato permite uma descarga elétrica de alta tensão, que varia de 5.000 até 15.000 volts. Esta descarga faz o controle da planta através da temperatura e pela dissociação molecular por eletrólise.

Fogo: um manejo bastante antigo, que faz a queima da vegetação, podendo ser as plantas daninhas ainda jovens ou em vegetação morta. Em vegetações jovens, foi utilizado no passado no Brasil antes da colonização pelos indígenas, e depois na cultura do algodão ou nas entressafras, e nos Estados Unidos nas culturas do sorgo e do algodão. Ambos Países não utilizam mais a técnica, pelo elevado custo dos combustíveis fósseis e pelo surgimento de herbicidas seletivos, obtendo por isso consideráveis benefícios ambientais. Em vegetação morta, foi bastante utilizado após a colheita de cereais de inverno, como o trigo, fazendo o controle de eventuais plantas daninhas que emergiam após a colheita e elevava a temperatura do solo, inviabilizando o banco de sementes. Também foi utilizado em canaviais, onde fazia a queimada para facilitar a colheita manual e, como consequência, controlava as plantas daninhas que ali estavam.

6 CONTROLE BIOLÓGICO

O controle biológico move muitas atenções, apesar de ser incipiente na prática, no que tange ao manejo de plantas daninhas, devido a suas especificidades e complexidade. O conceito de controle biológico, em termos de manejo fitossanitário, pode ser traduzido como a ação de parasitas, predadores ou patógenos, com a finalidade de manter a população do outro organismo a uma densidade menor do que ocorreria em sua ausência.

Em específico, para a ciência das plantas daninhas, o controle biológico de

plantas daninhas, eventualmente, não pode resolver todos os problemas com plantas daninhas, mas precisa ser considerado como uma técnica no manejo integrado de plantas daninhas. O objetivo do controle biológico não é erradicar, mas reduzir populações em níveis de dano econômico de uma lavoura, pomar, floresta ou horta, pela mitigação do problema. Pelo menos esse é um vislumbre mais conservador e realista dos fatos.

Estratégia clássica: consiste na importação e na liberação de patógenos da região de origem das plantas daninhas, após a liberação em pontos determinados, devendo o agente de biocontrole ser capaz de se estabelecer e autoperpetuar-se na nova área. Com essa prática, busca-se a não erradicação de espécies daninhas, mas a estabilização permanente de populações dessas espécies em níveis aceitáveis. É praticamente impossível parar a atividade desse agente, depois de liberado, sem uma campanha de erradicação maciça. O sucesso do estabelecimento depende da semelhança do novo ambiente com o ambiente de origem e a especificidade do inimigo natural (artrópodos e fungos podem ser específicos, enquanto animais vertebrados, não).

Alguns exemplos a se considerar: Índia- liberação de *Dactylopius ceylonicus* (do Brasil) para controlar *Opuntia littoralis* e *Opuntia oricola*; Austrália - foi controlada *Opuntia sp* pela importação da mariposa *Cactoblastis cactorum* (da Argentina); controle de *Hyperium perforatum* nos EUA pelo besouro *Crysolina quadrigemina*; controle de *Lantana camara* por: *Epinotia lantanae*, *ophiomyia lantyanae* e *Teleonemia scrupulosa* (Havaí); controle de *Slavinia molesta* por *Cyrtobagus salviniae* (Austrália, Nova Guiné).

Estratégia inundativa: baseia-se na multiplicação massal e em aplicações periódicas de patógeno, semelhante a aplicações de herbicidas, em que os agentes de biocontrole podem ser fungos (micoerbicidas ou bioerbicidas). Ao contrário do controle clássico, os agentes para herbicidas microbianos não devem disseminar-se rapidamente e não devem causar epidemias na estação seguinte. Eles são específicos ao alvo, são formulados, padronizados e registrados, possuindo portanto um ingrediente ativo, que é o organismo vivo (esporos ou fragmentos de micélio).

Para ilustrar, seguem alguns exemplos: em 1942, foi registrado o primeiro micoerbicida no Canadá (*Colletotrichum gloeosporioides f.* SP. Malvae.); nos Estados Unidos, existem produtos à base de formulação líquida de clamodósporos de *Phyto-*

phora palmivora e esporos secos de *Colletotrichum gloeosporioides* f. sp. *Aeschynomene*, além de *Colletotrichum gloeosporioides* f. sp. malvae para controle de *Malva pusilla* e *Alternaria cassiae* para controle de *Senna obtusifolia.*

Estratégia aumentativa: é uma modalidade menos utilizada que requer o periódico restabelecimento do agente de controle, com menor intensidade e frequência do que os micoerbicidas. É uma estratégia pesquisada para patógenos não cultiváveis (carvões e ferrugem). Exemplo: *Puccinia canaliculata* para controle de *Cyperus esculentus* (tiririca-amarela).

Amplo espectro: envolve a manipulação artificial de populações de inimigos naturais no controle de plantas daninhas. Exemplos: carpa-capim (peixe herbívoro) que come vegetação aquática; mamíferos aquáticos (peixe-boi); aves como ganso, patos e marrecos; vertebrados (carneiro, bode, etc) fazem pastejo seletivo.

As vantagens do controle biológico:

• Uma vez introduzido, o agente biológico permanece controlando as plantas daninhas, devido sua autoperpetuação (todavia, não é o caso do controle inundativo, em que se necessita de reaplicação);

• Pode ser utilizado em áreas inacessíveis, como lagos e florestas, etc.;

• Não há potencial poluição ambiental, toxicidade ambiental ou a mamíferos.

As desvantagens do controle biológico:

• Uma vez introduzido, o organismo biológico não pode ser controlado (para que seja atingido seu objetivo);

• O organismo pode não diferenciar a planta de valor econômico da planta daninha, ou mesmo nativa, causando problemas ambientais;

• Exigência de absoluta especificidade de um agente de biocontrole requer desenvolvimento intensivo de pesquisas que demandam grande orçamento e anos de pesquisa;

• Controle biológico é lento e não erradica a planta daninha;

• Conflito de interesse quando a planta daninha pode ser útil;

• O ambiente agrícola é um hábitat ecologicamente instável, ocorrendo um complexo de espécies daninhas, e o controle biológico de apenas uma delas seria economicamente inviável, havendo a necessidade de aplicação de outros métodos de controle.

No entanto, infelizmente, é uma estratégia de controle pouco utilizada, apesar de grande pesquisa direcionada, em que os motivos alegados para isso estejam atrelados a suas desvantagens. Os programas de pesquisa têm sido direcionados para atender, principalmente, a problemas que não têm sido eficientemente resolvidos pelos outros métodos de controle (TESSMANN, 2011). Mas isso vem mudando pelo mundo, e apesar de pouco conhecido e estudado no Brasil, não deveria ser entendido como mero método alternativo nem o último recurso.

7 CONTROLE QUÍMICO

O controle químico é realizado por meio dos "cidas" (provocam a morte, do grego), no caso de plantas daninhas, são os herbicidas. Os herbicidas podem ser substâncias de origem dita natural ou biológica (como aquelas derivadas de aleloquímicos) ou sintéticas (normalmente orgânicos), e podem ser denominadas genericamente de agrotóxicos (como na legislação brasileira), pesticidas, defensivos agrícolas, produtos fitossanitários e até mesmo fitofármacos. Eles agem inibindo, a nível metabólico e fisiológico, a germinação, ou o crescimento da plântula, ou o desenvolvimento do vegetal adulto.

Com a origem expressiva dos herbicidas, a partir da chamada "revolução verde", a partir de 1941, com a descoberta do 2,4-D, um grande salto ocorreu no manejo de plantas daninhas, permitindo crescimento das produtividades e maximização do sistema produtivo. Até meados do século 20, boa parte da agricultura mundial estava estagnada em pressupostos medievais de cultivo, baixa eficiência e produtividades desprezíveis, comparadas às atuais. Com o advento de várias tecnologias, dentre as quais os herbicidas, os sistemas produtores não só ganharam eficiência, mas também praticidade e mais segurança para o agricultor, além de segurança alimentar devido aos incrementos na produção global.

Os diferentes grupos de herbicidas, em conjunto, possuem ampla flexibilidade, podendo ser posicionados em pré-plantio-incorporado (PPI), pré-emergência (PRE) ou pós-emergência (POS). Seguem algumas vantagens e desvantagens do controle químico por herbicida:

Vantagens:

- Ação rápida e eficaz no controle de muitas espécies;
- Controle de plantas daninhas na linha da cultura e no solo;
- Controle de plantas daninhas perenes e persistentes;
- Permitem aplicações em diversas fases da cultura;
- Há produtos seletivos às plantas cultivadas, ampliando o uso;
- Em muitas situações, um custo compatível ou que permite viabilidade.

Desvantagens:

- Resíduos possíveis no ambiente que podem trazer danos;
- Seleção de espécies resistentes devido à pressão de seleção;
- Necessidade de especialização na aplicação;
- Toxicidade.

Devido ao significativo papel dos herbicidas para os agroecossistemas e para a produção agrícola, atuando no controle do agente biótico plantas daninhas, ainda nesse livro, será dedicado espaço especial a essa temática, ampliando assim o escopo e aprofundando em algumas nuances.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A prevenção e a erradicação, somadas aos controles propriamente ditos, que são em uma divisão didática os controles culturais, controles manuais e mecânicos, controle físico, controle biológico e controle químico, constituem o MIPD. Afirma-se que é uma divisão didática, pois eles estão inter-relacionados e são interdependentes dentro de um contexto de sustentabilidade dos sistemas produtivos. Essas estratégias de controle são extremamente válidas e, em conjunto, integram o essencial conceito e prática do MIPD, que visam a eliminar as plantas daninhas ou a garantir condições competitivas aos cultivos. Observando que, para a implementação adequada do MIPD, devemos considerar também a composição florística e a fitossociologia das plantas daninhas, banco de sementes e histórico da área, os períodos e níveis de interferência das plantas daninhas (PAI, PTPI e PCPI) e o sistema produtivo em que será aplicado o MIPD. Portanto, as práticas que, dentro do contexto agronômico, devem ser adotadas numa visão holística, não dispensam o emprego integrado de controles diversos no manejo de plantas daninhas.

REFERÊNCIAS

ADEGAS, F.S. et al. **Impacto econômico da resistência de plantas daninhas a herbicidas no Brasil**. Londrina: Embrapa Soja, Circular Técnica 132, 2017.

AGOSTINETTO, D.; VARGAS, L. Resistência de plantas daninhas a herbicidas. In: AGOSTINETTO, D.; VARGAS, L. (Eds.). **Resistência de plantas daninhas a herbicidas no Brasil**. Pelotas: Editora UFPel, 2014. p.9-32.

AGOSTINETTO, D.; SILVA, D.R.O.; VARGAS, L. Perda de rendimento da soja e nível de dano econômico pela interferência de buva resistente ao glifosato. **Plant Science**, v. 84, n. 1, p. 1-8, 2017.

ALBRECHT, L.P. et al. Teores de óleo, proteínas e produtividade de soja em função da antecipação da semeadura na região oeste do Paraná. **Bragantia**, v. 67, p. 865-873, 2008.

ALBRECHT, L.P.; ALBRECHT, A.J.P.; VICTORIA FILHO, R. Soja RR e o glyphosate. In: ALBRECHT, L.P.; MISSIO, R.F. (Eds.). **Manejo de cultivos transgênicos**. Curitiba: UFPR, 2013. p.25-45.

ALBRECHT, A.J.P. et al. Buva resistente a Paraquat: Situação atual e perspectivas. **Plantio Direto & Tecnologia Agrícola**, v. 166, p. 4-12, 2018.

ALBRECHT, L.P. et al. Performance of fall and winter crops in a no tillage system in west Paraná State. **Acta Scientiarum-Agronomy**, v. 40, p 349-399, 2018.

ALBRECHT, L.P.; ALBRECHT, A.J.P. Manejo de plantas daninhas na cultura do milho. **Plantio Direto & Tecnologia Agrícola**, v. 173, v. 29-33, 2020.

ALBRECHT, A.J.P. et al. Multiple resistance of *Conyza sumatrensis* to three mechanisms of action of herbicides. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 42, e 42485, 2020.

BANGSUND, D.A.; LEISTRITZ, F.L.; LEITCH, J.A. Assessing economic impacts of biological control of weeds: The case of leafy spurge in the northern Great Plains of the United States. **Journal of Environmental Management**, v. 56, p. 35-43, 1999.

BRASIL. **Regulamento de Defesa Sanitária Vegetal**, Decreto n. 24.114 de 12 de abril de 1934, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos, 1934.

BRASIL. **Lista de Pragas Quarentenárias**, Instrução Normativa n. 41, de 1° de julho de 2008, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2008.

BRASIL. **Requisitos Técnicos Obrigatórios ou Recomendados para Certificação de Unidades Armazenadoras em Ambiente Natural e o Regulamento de Avaliação da Conformidade das Unidades Armazenadoras**, Instrução Normativa n. 29, de 8 de junho de 2011, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2011.

BRASIL. **Estabelece a relação e espécies de sementes nocivas toleradas e proibidas na produção, na comercialização e no transporte de sementes nacionais e importadas**, Instrução Normativa n. 46, de 24 de setembro de 2013, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2013.

BRASIL. **Lista de Pragas Quarentenárias Presentes (PQP) para o Brasil**, Instrução Normativa n. 38, de 1° de outubro de 2018, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2018.

BRASIL. **Pragas Quarentenárias Ausentes, Pragas Quarentenárias Presentes e Pragas Não Quarentenárias Regulamentadas.** Instrução Normativa n. 45, de 22 de agosto de 2018, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2018.

CARVALHO, L.B. **Plantas daninhas**. 1. ed. Lages-SC, 2013.

CASTRO, G.S.A. et al. Sistemas de produção de grãos e incidência de plantas daninhas. **Planta Daninha**, v. 29, p. 1001-1010, 2011.

CONSTANTIN, J. et al (Eds.). **Biologia e manejo de plantas daninhas**. Curitiba-PR: Omnipax, 2011.

CHRISTOFFOLETI, P.J. et al. Resistência de plantas daninhas a herbicidas: Termos e definições importantes. In: CHRISTOFFOLETI, P.J.; NICOLAI, M. (Eds.). **Aspectos da resistência de plantas daninhas a herbicidas**. Piracicaba: ESALQ, 2016. p.11-32.

FERREIRA, G.A.; AQUILA, M.E.A. Alelopatia: uma área emergente na ecofisiologia. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 12, p. 175-204, 2000.

GAZZIERO, D.L.P.; VARGAS, L.; ROMAN, E.S. Manejo e controle de plantas daninhas em soja. In: VARGAS, L.; ROMAN, E.S. (Eds.). **Manual de manejo e controle de plantas daninhas**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2004. p.595-636.

GAZZIERO, D.L.P.; SILVA, A.F. **Caracterização e manejo de *Amaranthus palmeri*.** Londrina: Embrapa Soja. Documentos n.384, 2017.

GUIMARÃES, A.C.D.; INOUE, M.H.; IKEDA, F.S. (Eds.). **Estratégias de manejo de plantas daninhas para novas fronteiras agrícolas**. 1. ed. Unemat Editora e SBCPD, 2018.

HEAP, I. **International survey of herbicide-resistant weeds**. Disponível em:<http://www.weedscience.org>. Acesso em: jan. 2020.

LAMEGO, F.P. et al. Manejo de *Conyza bonariensis* resistente ao glyphosate: coberturas de inverno e herbicidas em pré-semeadura da soja. **Planta Daninha**, v. 31, n. 2, p. 433-442, 2013.

LORENZETTI, J.B. **Interferência de *Conyza spp.* na produtividade da soja e nível de dano econômico**. 28 p. 2019. Dissertação de Mestrado (Mestrado), UFPR: Palotina, 2019.

MONACO, T.J.; WELLER, S.C.; ASHTON, F.M. **Weed Science**: principles and practi-

ces. 4 ed. John Wiley & Sons, 2002.

NOLLA, A. et al. Growth and Accumulation of Nutrients by Weeds, in Maize and Legumes Intercrops. **Planta Daninha,** v. 36, p. 1-11, 2018.

NUNES, G.L. et al. Alelopatia de extratos vegetais de *Tabebuia sp*. sobre a germinação de sementes de plantas infestantes em culturas agrícolas. **Journal of Agronomic Sciences**, v. 3, p. 1-9, 2014.

OLIVEIRA, M.F.; BRIGHENTI, A.M. **Controle de plantas daninhas:** métodos físico, mecânico, cultural, biológico e alelopatia. 1. ed. Brasília-DF: Embrapa, 2018.

OLIVEIRA, R.S.; CONSTANTIN, J.; INOUE, M.H. (Eds.). **Biologia e manejo de plantas daninhas**. Curitiba, PR: Omnipax, 2011.

PELLIZZARO, E.C. et al. Redução no espaçamento do milho em solos de baixa altitude. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, p. 492-501, 2019.

QUEIROZ, A.R.S. et al. Rapid necrosis: A novel plant resistance mechanism to 2,4-D. **Weed Science**, v. 67, n. 1, p. 1-41, 2019.

REICHEL, T. et al. Alelopatia do extrato de erva-cidreira (*Lippia alba* Mill.) em sementes de picão-preto (*Bidens subalternans* D.C.). **Journal of Agronomic Sciences,** v. 2, p. 161-168, 2013.

SILVA, A.A.; SILVA, J.F. **Tópicos em Manejo de Plantas Daninhas**, Viçosa, MG: UFV, 2007.

SILVA, P.S.S. Atuação dos aleloquímicos no organismo vegetal e formas de utilização da alelopatia na agronomia. **Biotemas**, v. 25, n. 3, p. 65–74, 2012.

TESSMANN, D.J. Controle biológico: aplicações na área de ciência das plantas daninhas. In. OLIVEIRA, R.S.; CONSTANTIN, J.; INOUE, M.H. (Eds.). **Biologia e manejo**

de plantas daninhas. Curitiba, PR: Omnipax, 2011, p. 79-91.

VASCONCELOS, M.C.C.; SILVA, A.F.A.; LIMA, R.S. Interferência de plantas daninhas sobre plantas cultivadas. **Revista Agropecuária Científica no Semi-Árido**, v. 8, n. 1, p. 1-6, 2012.

WALL, D.; FRIESEN, G. Green Foxtail (*Setaria viridis*) Competition in Potato (*Solanum tuberosum*). **Weed Science**, v. 38, p. 396-400, 1990.

ZANON, A.J. et al. Contribuição das ramificações e a evolução do índice de área foliar em cultivares modernas de soja. **Bragantia**, v. 74, n. 3, p. 279-290, 2015.

ZIMDAHL, R.L. **Fundamentals of weed Science.** 3. ed. Elsevier, 2007.

CAPÍTULO 6

MECANISMOS DE AÇÃO DE HERBICIDAS

Rubem Silvério de Oliveira Jr.[1]
Denis Fernando Biffe[1]
Fellipe Goulart Machado[2]
Vanessa Francieli Vital Silva[2]

[1]Universidade Estad 1Professor Universidade Estadual de Maringá – UEM. Departamento de Agronomia. [2]Aluno de doutorado do Programa em Agronomia da UEM.

1 INTRODUÇÃO

Para identificar herbicidas, é útil agrupá-los de acordo com seu mecanismo de atuação nas plantas e sua estrutura química básica. O primeiro ponto importante que deve ser esclarecido é a diferença entre mecanismo de ação e modo de ação. Considera-se que o mecanismo de ação diz respeito ao primeiro ponto do metabolismo das plantas onde o herbicida atua. Neste caso, o mecanismo de ação é normalmente o primeiro de uma série de eventos metabólicos que resultam na expressão final do herbicida sobre a planta. O conjunto destes eventos metabólicos, incluindo os sintomas visíveis da ação do herbicida sobre a planta, é denominado de modo de ação.

A classificação dos herbicidas com base em seu mecanismo de ação tem sofrido mudanças ao longo do tempo, tanto em função da descoberta de novos herbicidas quanto pela elucidação dos sítios de atuação nas plantas. A classificação internacionalmente aceita atualmente é aquela proposta pelo Herbicide Resistence Action Committee (HRAC). Nela, os herbicidas são classificados por ordem alfabética de acordo com seus sítios de atuação e classes químicas (Tabela 1). No caso de diferentes grupos químicos compartilharem um mesmo mecanismo de ação, apenas uma letra é utilizada. No caso dos inibidores da fotossíntese, as subclasses C1, C2 e C3 indicam diferentes formas de ligação à proteína D1. O sintoma de *bleaching* (branqueamento) também pode ser causado de diferentes formas. Por consequência, os subgrupos F1, F2 e F3 foram criados. Herbicidas com sítios de ação desconhecidos são classificados como "desconhecidos" e agrupados no grupo "Z" até que seja possível classificá-los adequadamente. Para evitar confusões com "I" e "O", as categorias "J" e "Q" foram omitidas. Novos herbicidas serão classificados nos respectivos grupos ou em novos grupos (R, S, T...). O sistema de classificação da Weed Science Society of America (WSSA) (numérico) também é listado na Tabela 1.

Tabela 1: Classificação de herbicidas segundo o sítio de atuação e o grupo químico

HRAC	Mecanismo de ação	Grupo químico	WSSA
A	Inibidores da ACCase	Ariloxifenoxipropionatos (FOPs)	1
		Ciclohexanodionas (DIMs)	1
		Fenilpirazolinas (DENs)	1
B	Inibição da ALS	Sulfoniluréias	2
		Imidazolinonas	2
		Triazolopirimidinas	2
		Pirimidinil(tio)benzoatos	2
		Sulfonilaminocarboniltriazolinonas	2
C1	Inibidores do fotossistema II	Triazinas	5
		Triazinonas	5
		Triazolinonas	5
		Uracilas	5
		Piridazinonas	5
		Fenilcarbamatos	5
C2	Inibidores do fotossistema II	Ureias	7
		Amidas	7
C3	Inibidores do fotossistema II	Nitrilas	6
		Benzotiadiazinonas	6
		Fenilpiridazinas	6
D	Atuantes no fotossistema I	Bipiridíliuns	22

E	Inibidores da PROTOX	Difeniléteres	14
		Fenilpirazoles	14
		N-fenilftalimidas	14
		Tiadiazoles	14
		Oxadiazoles	14
		Triazolinonas	14
		Oxazolidinedionas	14
		Pirimidindionas	14
		Outros	14
F1	Inibidores da biossíntese de carotenoides na fitoeno desaturase (PDS)	Piridazinonas	12
		Piridinecarboxamidas	12
		Outros	12
F2	Inibidores da biossíntese de carotenoides na 4-hidroxifenil-piruvatodioxigenase (4-HPPD)	Tricetonas	27
		Isoxazoles	27
		Pirazoles	27
		Outros	27
F3	Inibidores da biossíntese de carotenoides (alvo desconhecido)	Triazoles	11
		Isoxazolidinonas	13
		Difeniléteres	11
G	Inibidores da EPSPS	Glicinas	9
H	Inibidores da GS	Ácido fosfínico	10
I	Inibidores da DHP (di-hidropteroato sintase)	Carbamatos	18
K1	Inibidores da formação de microtúbulos	Dinitroanilinas	3
		Fosforoamidatos	53
		Piridinas	3
		Benzamidas	3
		Ácido benzóico	3
K2	Inibidores da mitose	Carbamatos	23

K3	Inibidores da formação de microtúbulos	Dinitroanilinas	3
		Fosforoamidatos	53
		Piridinas	3
		Benzamidas	3
		Ácido benzóico	3
K2	Inibidores da mitose	Carbamatos	23
K3	Inibidores da divisão celular (ou inibidores de VLCFA)	Cloroacetamidas	15
		Acetamidas	15
		Oxiacetamidas	15
		Tetrazolinonas	15
		Outros	15
L	Inibidores da síntese de parede celular	Nitrilas	20
		Benzamidas	21
		Triazolocarboxamidas	27
		Ácido quinolinocarboxílico	26/27
M	Desacopladores (Disruptores de membrana)	Dinitrofenóis	24
N	Inibição da síntese de lipídeos - diferentes de inibidores da ACCase	Tiocarbamatos	8
		Fosforoditioatos	8
		Benzofuranas	16
		Ácido clorocarbônico	26
O	Mimetizadores da auxina	Ácido fenoxicarboxílico	4
		Ácido benzoico	4
		Ácido piridinecarboxílico	4
		Ácido quinolinocarboxílico	4
		Outros	4
P	Inibidores do transporte de auxinas	Ftalamatos	19
		Semicarbazonas	19
R ...	...	...	
S ...	...	...	

Z	Desconhecidos	Ácido arilaminopropiônico	25
		Pirazóliuns	26
		Organoarsenicais	17
		Outros	

A seguir, os principais mecanismos de ação serão descritos em relação a suas características gerais, ao modo de ação e sua seletividade. Também serão mencionados os principais grupos químicos, os princípios ativos e as marcas de herbicidas comerciais registradas para uso no Brasil.

2 MIMETIZADORES DA AUXINA – GRUPO O (4)

Grupo de herbicidas também conhecido por reguladores de crescimento, auxinas sintéticas ou herbicidas hormonais, em função da similaridade estrutural com a auxina natural das plantas. Este grupo tem importância histórica, uma vez que o 2,4-D foi o primeiro composto orgânico sintetizado pela indústria utilizado como herbicida seletivo.

2.1 Características gerais

Estes herbicidas afetam o crescimento das plantas de maneira similar às auxinas naturais das plantas, mas são mais persistentes e mais ativos. Todos são sistêmicos, portanto, podem controlar diversas plantas perenes. Efeitos no crescimento das plantas podem ser notados em doses muito baixas, o que implica frequentes problemas ligados à deriva destes herbicidas para culturas sensíveis ou com pulverizadores reutilizados sem lavagem adequada. Algumas culturas sensíveis a concentrações muito baixas destes herbicidas incluem tomate, uva, algodão, cucurbitáceas e soja. Controlam basicamente plantas daninhas dicotiledôneas anuais ou perenes e são seletivos para gramíneas.

2.2 Modo de ação

A ação inicial (mecanismo de ação) destes compostos envolve o metabolismo de ácidos nucleicos e a plasticidade da parede celular. Acredita-se que estes herbicidas possam causar a acidificação da parede celular através do estímulo da atividade da bomba de prótons da ATPase, ligada à membrana celular. A redução no pH apoplástico induz à elongação celular pelo aumento da atividade de certas enzimas responsáveis pelo afrouxamento celular. Baixas concentrações destes herbicidas também estimulam a RNA polimerase, resultando em aumentos subsequentes de RNA, DNA e biossíntese de proteínas. Aumentos anormais nestes processos levam à síntese de auxinas e giberilinas, as quais promovem divisão e alongamento celular acelerado e desordenado nas partes novas da planta, ativando seu metabolismo e levando ao seu esgotamento.

Estes herbicidas estimulam a liberação de etileno que, em alguns casos, pode produzir sintomas característicos de epinastia (SENSEMAN, 2007). O primeiro sintoma evidente de injúrias de herbicidas hormonais em plantas de folhas largas é a epinastia das folhas e pecíolos. À medida que outras funções metabólicas são afetadas, o metabolismo geral e as funções celulares normais são interrompidas, causando o aparecimento de outros sintomas: deformações nas nervações e no limbo foliar; paralisação do crescimento e engrossamento de raízes, podendo induzir ao aparecimento de raízes adventícias; tumores ao longo do caule da planta (principalmente nos nós), os quais estão ligados à obstrução do fluxo do floema. A morte de plantas suscetíveis ocorre de forma lenta, geralmente entre 3 e 5 semanas após a aplicação.

2.3 Seletividade

No caso dos herbicidas mimetizadores da auxina, as gramíneas são, em grande parte, tolerantes a herbicidas deste grupo. De modo geral, a tolerância das gramíneas é determinada pela penetração muito baixa e pela translocação limitada.

2.4 Grupos químicos e herbicidas

Grupo químico	Nomes comuns	Exemplos de nomes comerciais
Ác. Benzoico	Dicamba	Atectra, Dicamax
Ác. Piridinecarboxílicos	Fluroxypyr	Starane 200, Prestige
	Triclopyr	Garlon NA, Sector, Dorado
	Picloram	Browser, Leopard, Padron
Ác. Pirimidinecarboxílico	Aminocyclopyrachlor	-
Ác. Fenoxicarboxílicos	2,4-D	DMA 806 BR, U 46 BR, 2,4-D Nortox
	MCPA	Agritone
Ác. quinolinocarboxílico	Quinclorac	Facet
Arylpicolinates	Halauxifen-methyl (Arylex)	-
	Florpyrauxifen-benzyl (Rinskor)	-

3 INIBIDORES DO FOTOSSISTEMA II GRUPOS C1 (5), C2 (7) E C3 (6)

3.1 Características gerais

Os herbicidas deste grupo podem ser absorvidos via radicular, e a maioria, através das folhas. No entanto, quando utilizados em pós-emergência, uma cobertura completa das plantas é importante, uma vez que a translocação é limitada, o que demanda a utilização de adjuvantes para aumentar a ação foliar. Controlam muitas espécies de folhas largas e algumas gramíneas.

3.2 Modo de ação

A inibição da fotossíntese acontece pela ligação dos herbicidas deste grupo ao sítio de ligação da QB, na proteína D1 do fotossistema II, a qual se localiza nas membranas dos tilacoides dos cloroplastos, causando, por consequência, o bloqueio do transporte de elétrons de QA para QB. Isto interrompe a fixação de CO_2 e a produção de ATP e NADPH2, os quais são elementos essenciais para o crescimento das plantas. A morte das plantas, entretanto, na maioria dos casos, ocorre por causa de outros processos. Pensa-se que a clorose foliar que se desenvolve após o tratamento seja causada pela peroxidação de lipídeos. A peroxidação dos lipídeos é autocatalítica e espalha-se para outros lipídeos constituintes de membranas, como as do cloroplasto e de outras estruturas celulares. Estas reações acabam por promover a destruição das membranas e a perda de clorofila.

O processo de peroxidação acontece basicamente pela interrupção do fluxo de elétrons no fotossistema II, o que gera um estado energético tão elevado da clorofila (estado *triplet*) que sobrecarrega o efeito de atenuação de energia promovido pelos pigmentos carotenoides. O excesso de clorofila *triplet* pode iniciar o processo de peroxidação de lipídeos por meio de dois mecanismos (DAN HESS, 1994a): o primeiro é a formação direta de radicais lipídicos nos ácidos graxos insaturados constituintes das membranas. O segundo é que a clorofila *triplet* pode reagir com o oxigênio para produzir oxigênio *singlet*. O oxigênio pode então reagir com estes radicais para iniciar o processo de peroxidação, que resulta em danos às membranas.

3.3 Seletividade

As triazinas simétricas, como atrazine, são degradadas em muitas plantas tolerantes ao metabolismo do herbicida, especialmente pelo processo de conjugação com glutationa nas folhas, fazendo com que ele nunca chegue ao cloroplasto para causar injúrias. Além do processo de metabolismo, uma série de fatores, isolados ou em conjunto, pode ser responsável pela seleção de plantas tolerantes ou suscetíveis a herbicidas deste grupo: localização no solo (seletividade de posição), aplicação dirigida, absorção diferencial por raízes ou folhas, translocação diferencial

das raízes para as folhas, sorção em sítios inativos nas plantas; e dentro de uma mesma variedade, sementes maiores têm maior tolerância.

3.4 Grupos químicos e herbicidas

Grupo químico	Nomes comuns	Nomes comerciais
Amidas	Propanil	Herbipropanin, Propanil Fersol 360 EC, Stam 800 WG
Benzotiadiazi-nonas	Bentazon	Basagran 480
Nitrilas	Ioxynil	Totril
Triazinas	Ametryne	Ametrina Alta 500 SC, Gesapax 500 Ciba Geigy, Metrimex 500 SC
	Atrazine	Atrazina Nortox 500 SC, Primóleo, Proof
	Prometryne	Gesagard 500 SC, Arbaten, Caparol
Triazinonas	Hexazinone	Hexafort, Hexazinona Nortox, Netuno 750 WG
	Metribuzin	Sencor 480, Tenace, Metiz
	Metamitron	Goltix
Triazolinonas	Amicarbazone	Dinamic
Ureias	Diuron	Diuron Nortox 500 SC, Herburon WG, Karmex
	Linuron	Afalon 450 SC, Afalon SC
	Tebuthiuron	Ameris, Butiron, Lava 800

O bentazon, muito embora esteja incluído entre os inibidores do fotossistema II, apresenta muitas características em comum com os herbicidas atuantes no fotossistema I (utilização em pós-emergência, com ação rápida de necrose foliar).

4 ATUANTES NO FOTOSSISTEMA I GRUPO D (22)

4.1 Características gerais

Também são conhecidos como formadores de radicais livres ou bipiridíliuns. Embora os herbicidas agrupados neste mecanismo de ação, em última instância, causem a inibição da fotossíntese, a forma pela qual este processo é interrompido é diferente daquela imposta pelos inibidores do fotossistema II.

Apresentam alta solubilidade em água, sendo normalmente formulados como soluções aquosas. São cátions fortes e, por isso, são fortemente sorvidos por coloides do solo, o que resulta em sua rápida inativação. Apresentam rápida absorção foliar, o que leva ao aparecimento de injúrias nas plantas em questão de horas, podendo a morte ocorrer em um a dois dias. São produtos de contato, e a velocidade de aparecimento dos sintomas é proporcional à intensidade luminosa após a aplicação. São usados principalmente na operação de dessecação, precedendo a semeadura direta ou na dessecação pré-colheita.

4.2 Modo de ação

Funcionam como falsos aceptores de elétrons no fotossistema I na fotossíntese. A morte das plantas resulta de uma soma de processos que ocorrem em função da perda do estado de equilíbrio bioquímico. Uma série de reações de oxidação, produção de radicais livres, disrupção de membranas e oxidação de clorofilas pode ser observada à medida que progride a intoxicação das plantas. Resumidamente, a morte das plantas ocorre pela perda de fotossíntese dos tecidos afetados, pela destruição dos ácidos graxos nos tilacoides e outras membranas celulares próximos aos locais de produção de radicais livres e pelo dano que os radicais livres causam às células, levando à clorose, necrose e morte.

4.3 Seletividade

De modo geral, não são seletivos. No entanto, é possível usar estes herbicidas de modo seletivo por meio de aplicações dirigidas em pós-emergência, nas quais seja evitado o contato do jato pulverizado com as folhas da cultura.

4.4 Grupos químicos e herbicidas

Grupo químico	Nomes comuns	Nomes comerciais
Bipiridíliuns	Diquat	Reglone
	Dicloreto de paraquat	Gramoxone 200, Helmoxone, Paradox

Recentemente, a molécula do paraquat recebeu restrições quanto a sua disponibilidade no mercado. Em breve, a molécula será excluída no País devido a sua associação com o mal de Parkinson.

5 INIBIDORES DO CRESCIMENTO INICIAL GRUPOS K1 (3), K2 (23) E K3 (15)

Herbicidas deste mecanismo de ação estão divididos em três subgrupos: K1 (3), K2 (23) e K3 (15). No Brasil, são comercializados herbicidas apenas relacionados nos subgrupos K1 e K3.

Subgrupo K1 (3): são também conhecidos por inibidores da formação de microtúbulos ou inibidores da polimerização da tubulina. Benzamidas, derivados do ácido benzoico (DCPA), dinitroanilinas, fosforoamidatos e piridinas são exemplos de grupos químicos de herbicidas que se ligam à tubulina, proteína mais importante na formação dos microtúbulos. O complexo herbicida-tubulina inibe a polimerização dos microtúbulos, levando à desconfigurarão física e à perda de função. Em consequência, o fuso mitótico não ocorre, causando a falta de alinhamento e a separação dos cromossomos durante a mitose. Além disto, a chamada placa equatorial não se forma. Os microtúbulos também possuem função na formação da parede celular. A perda de

microtúbulos induzida pela presença de herbicidas pode causar o sintoma de intumescimento de extremidades de raízes, que ocorre nos tecidos meristemáticos, uma vez que eles não se dividem nem conseguem alongar-se (SENSEMAN, 2007).

Subgrupo K3 (15): inibidores da divisão celular (cloroacetamidas). Este subgrupo pode, por vezes, ser referenciado também como um mecanismo à parte. Primeiramente, este grupo foi denominado de inibidores do crescimento da parte aérea. Mais recentemente, foram denominados de inibidores da síntese de ácidos graxos de cadeia muito longa (ou, em inglês, inibidores de VLCFA - Very Long Chain Fatty Acids). O alachlor foi o primeiro herbicida deste grupo químico a ser comercializado, tendo um grande impacto na agricultura da época, uma vez que era um herbicida que podia ser usado tanto em soja quanto em milho, com um amplo espectro de ação (gramíneas e folhas largas), sem necessidade de incorporação ao solo. Além das cloroacetamidas, compõem este subgrupo as acetamidas, oxiacetamidas e tetrazolinonas.

5.1 Características gerais

Causam a paralisação do crescimento da raiz e da parte aérea de plântulas e podem causar a morte do meristema apical. Apresentam características químicas e físicas que favorecem seu desaparecimento rápido do solo (alta pressão de vapor, fotólise, decomposição microbiana). Controlam sementes em germinação de gramíneas anuais e de algumas folhas largas. São aplicados normalmente em pré-emergência, mas a incorporação ao solo aumenta a eficiência e diminui as perdas destes herbicidas.

5.2 Modo de ação

Os herbicidas do subgrupo K1 são considerados inibidores da mitose, mais especificamente da formação de microtúbulos. A ação do trifluralin sobre plantas sensíveis causa a inibição da mitose na prometáfase, pela interferência na polimerização da tubulina e na formação de microtúbulos (HESS; BAYER, 1977). O efeito

do trifluralin não envolve, necessariamente, a inibição da germinação de sementes (PARKA; SOPER, 1977), mas invariavelmente causa a inibição do crescimento radicular (LIGNOWSKI; SCOTT, 1972), caracterizando-se, sob o aspecto morfológico, pelo intumescimento das pontas de raízes sensíveis, o qual está associado à redução ou paralisação da divisão celular, embora a expansão radial das células se mantenha (HARTZLER et al., 1990).

Apesar de sua importância para a agricultura, pouco se sabe sobre o mecanismo de ação dos herbicidas do subgrupo K3. A ação fitotóxica destes herbicidas acontece pela inibição da síntese de proteínas (provavelmente várias) nos meristemas apicais da parte aérea e das raízes em espécies suscetíveis. Esta inibição resulta na paralisação da divisão celular e aumento de tamanho das células, causando a inibição do crescimento da raiz e da parte aérea (UNIVERSITY OF MINNESOTA, 2009).

5.3 Seletividade

Para o subgrupo K1, a localização espacial do produto no solo (seletividade de posição) é o principal modo por meio do qual algumas espécies são sensíveis e outras tolerantes.

Para o subgrupo K3, a seletividade pode estar relacionada à taxa de metabolismo, mas isto ainda não está totalmente comprovado. O uso de safeners (protetores) tem sido utilizado neste grupo para conferir tolerância, por exemplo, a s-metolachlor. Em certos casos, a seletividade de posição também é importante para separar espécies tolerantes de espécies suscetíveis.

5.4 Grupos químicos e herbicidas

Grupo químico	Nomes comuns	Nomes comerciais
Subgrupo K1 (3)		
Dinitroanilinas	Pendimethalin	Herbadox 400 EC
	Trifluralin	Premerlin 600 EC, Trifluralina Nortox Gold
Subgrupo K3 (15)		
Cloroacetamidas	S-metolachlor	Dual Gold, Gardomil
	Pyroxasulfone	Yamato

6 INIBIDORES DA PROTOX – GRUPO E (14)

6.1 Características gerais

Podem ser absorvidos pelas raízes, caule ou folhas de plantas novas. Geralmente apresentam pouca ou nenhuma translocação nas plantas e, de modo geral, requerem luz para serem ativados. Partes das plantas expostas aos produtos e à luz morrem rapidamente (um a dois dias). Dentro deste mecanismo de ação, o maior número de herbicidas é aplicado à parte aérea das plantas, mas existem herbicidas com destacada atividade no solo, como o sulfentrazone. Neste caso, o período de atividade residual no solo varia consideravelmente entre herbicidas e pode haver casos de ocorrência de *carryover*.

6.2 Modo de ação

O mecanismo de ação dos produtos deste grupo parece estar relacionado com a inibição da enzima protoporfirinogênio oxidase (PPO ou PROTOX), que atua na oxidação de protoporfirinogênio à protoporfirina IX (precursores da clorofila). Com a inibição da enzima, ocorre o acúmulo de protoporfirinogênio, que se difunde

para fora do centro reativo, onde acontece uma oxidação não enzimática dela. Aparentemente, a protoporfirina IX produzida pela via não enzimática apresenta uma conformação estrutural diferente daquela produzida pela via normal. Posteriormente, ocorre a interação entre O_2 e luz, que leva o O_2 ao estado *singlet*, o qual seria responsável, em última instância, pela peroxidação de lipídeos observada nas membranas celulares. Lipídeos e proteínas são oxidados, resultando em perda da clorofila e de carotenoides, e no rompimento das membranas, o que faz com que as organelas desidratem e desintegrem-se rapidamente. Quando aplicados em pré-emergência, estes herbicidas causam a morte das plantas quando estas entram em contato com a camada de solo tratada. Os tecidos sensíveis sofrem rapidamente necrose e morte, causadas pela peroxidação de lipídeos. Plantas suscetíveis apresentam necrose nas folhas rapidamente (um a três dias). Mesmo em espécies consideradas tolerantes, as plantas podem exibir injúrias de moderadas a severas após a aplicação destes herbicidas em pós-emergência. Doses subletais podem produzir sintomas de bronzeamento das folhas mais novas, ao passo que a deriva de pequenas gotas causa o aparecimento de pequenas manchas brancas nas folhas.

6.3 Seletividade

Quando em contato direto com a folhagem, apresentam pouca seletividade. No entanto, muitas culturas têm capacidade de rapidamente recuperar a área foliar afetada (ex.: lactofen e acifluorfen aplicados em soja), ocorrendo certo nível de injúria, mas as plantas recuperam-se (o efeito é unicamente de contato, as folhas novas que saem após a aplicação não são afetadas). Herbicidas como o flumioxazin e o carfentrazone podem ser usados em misturas com herbicidas como glyphosate e 2,4-D em operações de dessecação pré-plantio, normalmente com o intuito de acelerar o efeito de dessecação ou de melhorar o controle sobre plantas daninhas específicas (JAREMTCHUK et al., 2008).

6.4 Grupos químicos e herbicidas

Grupo químico	Nomes comuns	Nomes comerciais
Difeniléteres	Fomesafen	Flex
	Lactofen	Drible, Naja, Acillatem
	Oxyfluorfen	Galigan 240 F, Goal BR
N-fenilftalimidas	Flumiclorac-pentil	Radiant 100
	Flumioxazin	Flumyzin 500, Sumisoya, Sumyzin 500
Oxadiazóis	Oxadiazon	Ronstar 250 BR
Triazolinonas	Carfentrazone-ethyl	Aurora 400 EC, Spotlight
	Sulfentrazone	Boral 500 SC, Solara 500, Kicker
Pirimidinadionas	Saflufenacil	Heat, Heat NA, Valeos

7 INIBIDORES DA BIOSSÍNTESE DE CAROTENOIDES GRUPOS F1 (12), F2 (27) E F3 (11,13)

Este mecanismo de ação caracteriza-se principalmente pelo sintoma de injúria comum, caracterizado pela despigmentação das folhas ocasionada pela foto-degradação da clorofila que ocorre após o bloqueio da síntese dos pigmentos carotenoides, o que explica serem frequentemente chamados de *bleachers*. Subdivide-se em três conjuntos de herbicidas, que diferem entre si em função do sítio de atuação no bloqueio dos pigmentos carotenoides, mas que apresentam em comum o mesmo sintoma de injúria nas plantas.

7.1 Características gerais

Estes herbicidas resultam na perda de praticamente todos os pigmentos das folhas das plantas suscetíveis, resultando numa aparência “albina”. A deriva de

herbicidas deste grupo pode danificar culturas vizinhas, principalmente para clomazone; o potencial para deriva é maior quando estes herbicidas não são incorporados ao solo. A decomposição acontece basicamente pela atividade de microrganismos do solo, com hidrólise e fotólise desempenhando papéis secundários.

7.2 Modo de ação

Considera-se que herbicidas deste grupo atuam de maneira geral em alguns sítios enzimáticos da rota da síntese dos pigmentos carotenoides. O bloqueio da síntese destes pigmentos é o fenômeno responsável pelo surgimento do sintoma característico de "albinismo" ou despigmentação.

No primeiro subgrupo (F1 (12)), encontram-se as piridazinonas (norflurazon), as piridinecarboxamidas (diflufenican, picolinafen) e o fluridone, os quais são exemplos de herbicidas que bloqueiam a síntese de carotenoides pela inibição da fitoeno desaturase. Sua inibição causa o acúmulo de fitoeno. Tricetonas, isoxazoles e pirazoles (F2 (27)) são exemplos de herbicidas que inibem outra enzima, a p-hidroxifenilpiruvato desidrogenase (HPPD), que é a responsável pela conversão do p-hidroximetilpiruvato à homogentisato. Esta é uma reação-chave na síntese de plastoquinona e sua inibição dá início aos sintomas de branqueamento nas folhas que emergem após a aplicação. Estes sintomas resultam de uma inibição indireta da síntese de carotenoides devido ao envolvimento da plastoquinona como cofator da fitoeno desaturase (SENSEMAN, 2007).

O sítio de atuação específico das isoxazolidinonas (F3 (13)) (clomazone) parece ser singular, uma vez que não causa o acúmulo do fitoeno (DUKE; KENYON, 1986) nem inibe a biossíntese de geranilgeranil pirofosfatase (CROTEAU, 1992). Evidências sugerem que o clomazone é metabolizado para a forma 5-ceto-clomazone pelas hemoproteínas do sistema citocromo P-450 monoxigenase, tornando-se ativa como herbicida (YUN et al., 2005). A forma 5-ceto inibe a 1-deoxi-xilulose 5-fosfatase sintase (DOXP), um composto-chave para a síntese de isoprenoides dos plastídeos (FERHATOGLU; BARRET, 2006).

Para os três subgrupos, o efeito dos herbicidas resulta no sintoma típico, chamado de crescimento albino. Embora o crescimento ainda continue por algum

tempo, sem a produção de tecidos fotossintéticos verdes o crescimento das plantas afetadas não pode ser mantido. O crescimento cessa e então começam a aparecer os sintomas de necrose. Os herbicidas que inibem a biossíntese de carotenoides não afetam os carotenoides pré-existentes. Portanto, os tecidos formados antes do tratamento não mostram os sintomas albinos típicos. Embora o crescimento das partes novas seja branco, estes herbicidas não inibem diretamente a biossíntese de clorofila. A perda de clorofila é o resultado da destruição dela pela luz (foto oxidação), ou talvez devido à falta de carotenoides indiretamente causando a disrupção indireta da biossíntese de clorofila e do desenvolvimento do cloroplasto. Portanto, sem a presença dos carotenoides, as clorofilas não são capazes de se manterem funcionais e estáveis.

7.3 Seletividade

No caso do algodão e do arroz, a tolerância ao clomazone por estas culturas é conferida pela inibição da enzima Citocromo P-450 monoxigenase presente nas células do mesófilo, por meio do uso de protetores como o dietholate e outros inseticidas organofosforados. Os protetores são responsáveis pela diminuição da atividade do citocromo, evitando que o clomazone seja transformado na forma ativa (5-ceto clomazone) (FERHATOGLU et al., 2005). No caso da soja, a seletividade do clomazone também pode estar relacionada a um somatório de outros fatores secundários, como hidroxilação, rompimento da cadeia no radical -N-CH2, conjugação com metabólitos, metabolismo mais intenso e menor translocação para os locais de atuação.

7.4 Grupos químicos e herbicidas

Grupo químico	Nomes comuns	Nomes comerciais
N-fenilftalimidas	Flumiclorac-pentil	Radiant 100
Subgrupo F2 (27)		
Inibidores da HPPD		

Isoxazoles	Isoxaflutole	Fordor 750 WG, Provence 750 WG
Calistemônios	Mesotrione	Callisto, Lumica, Meristo
Tricetonas	Tembotrione	Soberan
Subgrupo F4 Inibidores da DOXP sintase		
Isoxazolidinonas	Clomazone	Gamit, Gamit Star, Gamit 360 CS

8 INIBIDORES DA ACCASE – GRUPO A (1)

8.1 Características gerais

Compreendem dois grupos químicos, que embora quimicamente diferentes apresentam grande semelhança em termos de espectro de controle, eficiência, seletividade e modo de ação. Os ariloxifenoxipropionatos (APPs) foram introduzidos no final da década de 70 e as ciclohexanodionas (CHDs) durante a década de 80. Um terceiro grupo, denominado fenilpirazolinas, terá em breve herbicidas disponíveis no mercado brasileiro.

São considerados herbicidas sistêmicos, controlando tanto gramíneas anuais quanto perenes. Espécies dicotiledôneas (tanto plantas daninhas quanto culturas) são normalmente tolerantes. A absorção ocorre basicamente por via foliar, mas resíduos no solo destes herbicidas podem, em certas circunstâncias, resultar em *carryover* para culturas gramíneas cultivadas em sucessão. Apresentam antagonismo quando aplicados em pós-emergência em misturas em tanque com outros herbicidas latifolicidas, em especial com os mimetizadores da auxina e com inibidores da PROTOX. Na maioria dos casos, requerem adjuvantes para melhorar a absorção foliar, exceto naqueles produtos que já trazem na formulação de fábrica tais compostos.

8.2 Modo de ação

O local de ação destes herbicidas é a acetil-coenzima A carboxilase (ACCase). Esta enzima, encontrada no estroma dos plastídios converte acetil coenzima A (acetil co-A) à malonilcoenzima-A (malonil co-A) através da adição de CO_2 (HCO_3) à acetil Co-A, no primeiro passo do processo de biossíntese dos ácidos graxos. A inibição da síntese de ácidos graxos bloqueia a produção de fosfolipídeos usados na construção de novas membranas necessárias para o crescimento celular. O crescimento das plantas suscetíveis cessa logo após a aplicação. Os primeiros sintomas em gramíneas são observados nos meristemas (próximos aos entrenós), onde ocorre descoloração, necrose e morte das gemas de crescimento. Folhas mais desenvolvidas podem adquirir coloração arroxeada ou avermelhada, lembrando sintomas de deficiência de fósforo (VIDAL, 1997).

8.3 Seletividade

O mecanismo de seletividade entre espécies dicotiledôneas e gramíneas ocorre no sítio de atuação (insensibilidade da ACCase). Nenhuma diferença significativa na absorção, translocação ou metabolismo tem sido demonstrada entre estas plantas (DAN HESS, 1994b). De forma análoga, a tolerância natural de algumas gramíneas parece ocorrer em função de uma forma menos sensível da ACCase.

8.4 Grupos químicos e herbicidas

Grupo químico	Nomes comuns	Nomes comerciais
Ariloxifenoxipropionatos (“FOPS”)	Cyhalofop-butyl	Clincher
	Clodinafop-propargyl	Topik 240 EC
	Fenoxaprop-p-ethyl	Podium EW, Rapsode, Starice
	Fluazifop-p-butyl	Fusilade 250 EW, Pilot
	Haloxyfop-p-methyl	Gallant R, Verdict R, Venture
	Propaquizafop	Acert
	Quizalafop-p-ethyl	Targa 50 EC, Targa Max
	Quizalafop-p-tefuryl	Panther 120 EC
Ciclohexanodionas (“DIMS”)	Clethodim	Poquer, Select 240 EC, Select One Pack
	Profoxydim	Aura 200
	Sethoxydim	Poast
	Tepraloxydim	Aramo 200
Fenipirazolinas (“DENS”)	Pinoxaden	Em fase de registro

9 INIBIDORES DA ALS – GRUPO B (2)

Imidazolinonas, pirimidinil(tio)benzoatos, sulfonilaminocarbonitriazolinonas, sulfonilureias e triazolopirimidinas são grupos químicos que inibem a acetolactato sintase (ALS). A morte das plantas resulta de eventos que ocorrem em função da inibição da ALS e da produção de aminoácidos de cadeia ramificada. Os inibidores da ALS têm sido intensivamente utilizados em função da alta eficiência em doses muito baixas, baixa toxicidade para mamíferos e boa seletividade para várias das culturas de grande importância econômica. A combinação do uso generalizado e da facilidade com que plantas daninhas desenvolvem resistência aos inibidores da ALS resultou na seleção de muitas espécies resistentes. Novos casos de resistência têm surgido neste grupo em maior número do que em qualquer outro nos últimos

anos. Em função da importância e do número de herbicidas que são classificados neste grupo, as imidazolinonas, sulfoniluréias e as triazolopirimidinas são detalhadas a seguir.

9.1 Características gerais

Esta classe de herbicidas foi descoberta pelos cientistas da American Cyanamid Company durante a década de 70. Em função de sua versatilidade, baixa toxicidade e segurança ambiental, estes herbicidas têm sido usados em muitas culturas e desempenharam papel fundamental na produção de alimentos e fibras no mundo todo. As imidazolinonas e as sulfonilureias, embora quimicamente diferentes, atuam no mesmo sítio de ação e geralmente produzem sintomas de fitotoxidade similares nas plantas suscetíveis. Ambos os grupos são efetivos em doses muito baixas (< 0,15 kg ha^{-1}), e a maioria é altamente seletiva, controlando um largo espectro de folhas largas de ciclo anual. Os resultados de estudos a respeito do potencial de toxicidade dos inibidores da ALS demonstram que estas moléculas têm um baixo potencial toxicológico, em parte porque elas agem inibindo um processo biossintético num sítio presente apenas nas plantas. A acetolactato sintase (ALS), enzima sobre a qual atuam estes herbicidas, não ocorre nos animais, que dependem das plantas para a ingestão dos aminoácidos produzidos pela atuação da enzima (leucina, isoleucina e valina).

9.2 Modo de ação

O mecanismo de ação é a inibição da ALS, a enzima-chave na rota de biossíntese de aminoácidos valina, leucina e isoleucina. Após a absorção, estes herbicidas são rapidamente translocados para áreas de crescimento ativo (meristemas). Em plantas suscetíveis, ocorre a paralisação do crescimento e o desenvolvimento de clorose internerval e/ou arroxeamento foliar dentro de 7 a 10 dias após a aplicação do herbicida. Folhas em emergência podem aparecer manchadas e malformadas. Pode também haver inibição do crescimento de raízes laterais quando resíduos do

produto estão presentes no solo. Normalmente, nas folhas largas, o meristema apical necrosa e morre antes que as demais partes mais velhas da planta.
As plantas acabam morrendo devido à incapacidade de produzir os aminoácidos essenciais de que necessitam. Excelentes revisões sobre o mecanismo de ação dos inibidores da ALS são feitas nos trabalhos publicados por Schloss (1990) e Durner et al. (1991).

9.3 Seletividade

O mecanismo primário de seletividade natural às imidazolinonas é a capacidade das espécies de metabolizar os herbicidas a metabólitos não tóxicos; a absorção e a translocação influenciam pouco a tolerância. Para as sulfonilureias, o mecanismo isolado de maior importância em termos de seletividade é a conversão rápida a compostos inativos nas plantas tolerantes, ao passo que pouco ou nenhum metabolismo pode ser medido em plantas sensíveis. A aveia, o trigo e a cevada, por exemplo, podem acrescentar um grupamento -OH ao anel fenil do chlorsulfuron, após a conjugação do herbicida com carboidratos (BEYER JUNIOR et al., 1988). A sensibilidade relativa de plantas às triazolopirimidas é função do tempo necessário para absorção e translocação e da taxa de metabolismo dentro da planta. No caso da soja, a tolerância é significativamente maior em pré do que em pós-emergência.

9.4 Grupos químicos e herbicidas

Grupo químico	Nomes comuns	Nomes comerciais
Imidazolinonas	Imazamox	Raptor 70 DG, Sweeper
	Imazapic	Plateau
	Imazapyr	Chopper Florestal, Contain, Cultifix
	Imazaquin	Imazaquin Ultra Nortox
	Imazethapyr	Imazetapir Plus Nortox, Pivot 100 SL, Vezir

Sulfonilureias	Chlorimuron-ethyl	Classic, Clorim, Clorimuron Nortox
	Cyclosulfamuron	Invest
	Ethoxysulfuron	Gladium
	Iodosulfuron-methyl	Hussar
	Metsulfuron-methyl	Accurate, Ally, Wolf
	Nicosulfuron	Accent, Nicosulfuron Nortox 40 SC, Sanson 40 SC
	Pyrazosulfuron-sodium	Sirius 250 SC
	Trifloxysulfuron-sodium	Envoke, Actend, Kleios
Triazolopirimidinas sulfonamidas	Cloransulam-methyl	Pacto
	Diclosulam	Coact, Spider 840 WG
	Flumetsulam	Scorpion
	Penoxsulam	Ricer
	Pyroxsulam	Tricea
Pirimidinil(tio)benzoatos	Bispyribac-sodium	Nominee 400 SC, Sonora
	Pyrithiobac-sodium	Staple 280 CS

10 INIBIDORES DA EPSP SINTASE – GRUPO G (9)

O glyphosate é o herbicida mais utilizado e estudado no mundo, principalmente por seu amplo espectro de ação. O glyphosate foi objeto de revisão detalhada na obra publicada por Velini et al. (2009).

10.1 Características gerais

Atua apenas em pós-emergência. Não tem atividade em pré-emergência devido à intensa sorção ao solo. Uma vez que é fortemente sorvido, torna-se não disponível para absorção pelas plantas. Embora tenha pressão de vapor desprezível

(pouco volátil), problemas de deriva podem acontecer com alguma frequência. As injúrias por deriva aumentaram consideravelmente com a introdução das culturas tolerantes ao glyphosate.

10.2 Modo de ação

O glyphosate bloqueia a enzima EPSPs (5-enolpiruvilchiquimato-3-fosfato sintase), que catalisa a ligação dos compostos chiquimato 3-fosfato (S3P) e fosfoenolpiruvato (PEP), produzindo o enolpiruvilchiquimato-3-fosfato e fosfato inorgânico. A enzima reage inicialmente com o S3P e depois com o PEP. A inibição da EPSPs leva ao acúmulo de altos níveis de chiquimato nos vacúolos, o que é intensificado pela perda de controle do fluxo de carbono na rota (FEDTKE; DUKE, 2005). Ocorre ainda o bloqueio da síntese de três aminoácidos aromáticos: triptofano, fenilalanina e tirosina (ZABLOTOWICZ; REDDY, 2004). Em plantas suscetíveis tratadas com glyphosate, a molécula do herbicida não se liga à enzima livre, mas ao complexo EPSPs-S3P, impedindo a ligação do PEP, formando o complexo inativo EPSPs-S3P--glyphosate. A afinidade do glyphosate ao complexo EPSPsS3P é 75 vezes maior do que com o PEP, e sua dissociação do sítio de ação é 2.000 vezes menor do que com o PEP (REAM et al., 1992).

O glyphosate é absorvido pelas folhas e outras partes aéreas das plantas. Uma vez absorvido, transloca-se rápida e intensivamente pelo simplasto. Depois de atingir o floema, geralmente segue o fluxo de movimento de fotoassimilados fonte-dreno e acumula-se em áreas de crescimento ativo (meristemas). Após, ocorre a paralisação do crescimento, e muitos tecidos das plantas degradam-se lentamente em função da falta de proteínas.

Os sintomas geralmente desenvolvem-se lentamente, com gradual aparecimento de clorose e necrose. A morte da planta suscetível pode ocorrer em alguns dias ou semanas. Embora o mecanismo de ação do glyphosate seja amplamente conhecido, alguns outros possíveis efeitos sobre as plantas são menos estudados. Estes efeitos secundários, no entanto, podem apresentar implicações importantes no crescimento de plantas e de microrganismos (KREMER; MEANS, 2009; ZOBIOLE et al., 2010 a,b,c).

10.3 Seletividade

Este herbicida é tradicionalmente utilizado como herbicida não seletivo para dessecação em áreas de semeadura direta. Em aplicações dirigidas, pode ser aplicado às entrelinhas de muitas culturas perenes, desde que não atinja as folhas. Com o advento das plantas transgênicas, o glyphosate passou a ser uma opção para o controle seletivo de plantas daninhas em soja, milho e algodão no Brasil, e canola, mamão, alfafa e beterraba açucareira em outros países.

10.4 Grupo químico e herbicidas

Grupo químico	Nomes comuns	Nomes comerciais
Glicinas	Glyphosate	Roundup Transorb, Roundup WG, Zapp QI 620

11 INIBIDORES DA GLUTAMINA SINTETASE (GS) GRUPO H (10)

11.1 Características gerais

Até alguns anos atrás, o amônio glufosinate, único herbicida com este mecanismo de ação, era considerado apenas um herbicida de amplo espectro, não seletivo. Com o surgimento da tecnologia Liberty Link®, passou também a ser usado para controle de plantas daninhas em algumas culturas. Trata-se de um gene de resistência ao amônio glufosinate que foi introduzido em algumas variedades de algodão, canola, beterraba açucareira, soja e milho.

Outra novidade introduzida no mercado diz respeito à tecnologia de proteção contra insetos (híbridos denominados Herculex, Yieldgard, VTPRO ou outros), criada pela introdução do gene cry1F, proveniente de um microrganismo que ocorre naturalmente no solo, o *Bacillus thuringiensis* (Bt), em que é responsável pela

produção de uma proteína inseticida. Os híbridos de milho com esta característica apresentam também a tecnologia Liberty Link®, que foi utilizada como marcador de seleção durante o processo de desenvolvimento do evento.

11.2 Modo de ação

Este herbicida inibe a atividade da glutamina sintetase (GS), enzima que converte o glutamato e amônia em glutamina. É uma enzima-chave no metabolismo do nitrogênio, uma vez que, além de assimilar amônia produzida pela nitrito redutase, ela recicla amônia produzida por outros processos. A inibição da atividade da GS leva ao acúmulo rápido de altos níveis de amônia, que, por sua vez, leva à destruição das células e inibe diretamente as reações dos fotossistemas I e II. O acúmulo de amônia causado pelo glufosinate é acompanhado pela paralisação da fotossíntese e disrupção da estrutura dos cloroplastos. Outra possibilidade para explicar a paralisação da fotossíntese é o acúmulo de glioxilato, um inibidor da RuBP carboxilase (DEVINE et al., 1993).

Recentemente, Takano et al. (2019) investigaram as consequências bioquímicas e fisiológicas da inibição da GS e propuseram nova explicação para a rápida expressão de sintomas de intoxicação deste herbicida nas plantas. Plantas mono e dicotiledôneas, com diferentes formas de assimilação de carbono (C3 e C4), foram selecionadas como modelos. A sensibilidade ao glufosinate foi proporcional à absorção do herbicida pelas plantas. A absorção do herbicida também se correlacionou com o nível de inibição da GS e o acúmulo de amônia na planta mesmo com todas as espécies tendo os mesmos níveis de sensibilidade da enzima *in vitro*. A depleção, tanto da glutamina quanto do glutamato, ocorreu em folhas tratadas com glufosinato. O acúmulo de amônia em resposta à inibição da GS, normalmente considerada como o evento que dá início à toxicidade do glufosinato, ocorreu em todas as espécies, mas não se correlacionou nem com reduções na assimilação de carbono nem com morte de células. Plantas tratadas com glufosinate demonstraram grande geração de espécies de oxigênio reativo, seguidas de acúmulo de malondialdehyde. Consequentemente, foi proposto que o glufosinato é tóxico para as plantas, não por causa do acúmulo de amônia nem pela inibição da assimilação de carbono, mas, sim,

pela produção de espécies reativas de oxigênio, levando à peroxidação de lipídeos das membranas celulares e à rápida morte celular.

11.3 Seletividade

O glufosinate é considerado um herbicida não seletivo. Embora exista considerável variação entre espécies em relação à sensibilidade a este herbicida, a variação não ocorre em função de diferenças na GS (RIDLEY; MCNALLY, 1985). Plantas transgênicas resistentes ao glufosinate têm sido produzidas por meio da tecnologia Liberty Link®.

11.4 Grupo químico e herbicidas

Grupo químico	Nomes comuns	Nomes comerciais
Ác. fosfínico	Amônio glufosinate	Finale, Liberty, Fascinate BR

12 INIBIDORES DA SÍNTESE DE CELULOSE) PAREDE CELULAR GRUPO L (20, 21, 26, 27, 29)

Grupo de herbicidas classificados como inibidores da síntese de (celulose) parede celular é composto por alguns grupos químicos e seus respectivos herbicidas: nitrilas (dichlobenil, chlortiamid), benzamidas (isoxaben), triazolocarboxamidas (flupoxam), ácido quinolinocarboxílico (quinclorac – apenas no caso de monocotiledôneas – também grupo O) e alkylazine (indaziflam). Dentre estes herbicidas, somente o indaziflam apresenta registro para o uso no Brasil como herbicida aplicado em pré-emergência das plantas daninhas.

12.1 Características gerais

Em 1950, foi descoberto o primeiro composto dos inibidores da síntese de parede celular (dichlobenil). Em 1961, alguns herbicidas do grupo thiobenzamides foram desenvolvidos atuando como pro-herbicidas, sendo convertidos em dichlobenil no solo e atuando como herbicidas. As doses iniciais destes herbicidas apresentavam-se (5.400 a 8.100 g i.a. ha^{-1}) para controle das plantas daninhas. Contudo, com o desenvolvimento de novas moléculas, aumentou-se a eficiência dos herbicidas, e as doses foram reduzidas para 100 g i.a. ha^{-1} com o fluxopam (triazolocarboxamidas), em 1993 (DIETRICH et al., 2019).

O indaziflam foi introduzido no mercado dos Estados Unidos em 2010, sendo classificado como um novo tipo de herbicida do grupo inibidor da parede celular que atua como herbicida pré-emergente, utilizando baixas dosagens e apresentando alta persistência no solo. É recomendado para culturas perenes, como vinhedos, citros, oliveiras e cana-de-açúcar, além de ser utilizado em aplicações de áreas não cultivadas. No Brasil, é recomendado para citros, café e cana-de-açúcar, e existem herbicidas que apresentam em sua formulação a mistura de indaziflam com metribuzin ou isoxaflutole (Allion Pro e Provence Total) (RODRIGUES; ALMEIDA, 2018). Seu espectro de controle é amplo, controlando tanto plantas daninhas de folha larga como de folha estreita.

Em relação à resistência de plantas daninhas a este mecanismo de ação, o quinclorac apresenta quatro casos de plantas daninhas resistentes em aplicações de pós-emergência. Porém, em pré-emergência, atualmente, não existem relatos de plantas daninhas resistentes, aumentando assim a importância deste grupo de herbicida para o manejo de plantas daninhas (HEAP, 2019).

12.2 Modo de ação

Conforme a classificação do HRAC, herbicidas pertencentes ao grupo L são inibidores da síntese de celulose. Estes herbicidas, como o indaziflam, apresentam modo de ação pela inibição da incorporação da glicose na parede celular, havendo a má formação do tecido e promovendo sintomas característicos como: paralisação

do crescimento, engrossamento de raiz e redução de celulose na planta (TATENO et al., 2015). Plantas sensíveis à ação destes herbicidas absorvem o produto logo após a germinação, paralisando o crescimento e a morte da planta.

12.3 Seletividade

A seletividade dos herbicidas inibidores da parede celular dá-se por meio da localização do herbicida no solo (seletividade de posição). Deste modo, culturas que apresentam sistema radicular profundo, como plantas perenes (citros e café) e até a cana-de-açúcar, não entram em contato com o produto aplicado no solo, evitando possíveis sintomas de fitotoxidade.

13 MECANISMO DE AÇÃO DESCONHECIDO: GRUPO Z (25, 26, 17)

Uma vez que os sítios de atuação destes herbicidas não são conhecidos, é possível que eles apresentem diferenças no mecanismo de ação entre eles e em relação aos demais grupos. Os grupos químicos que se enquadram neste grupo são listados na Tabela 1. O único herbicida registrado para uso no Brasil, classificado neste mecanismo de ação, é o MSMA.

MSMA (Ancosar 720, MSMA 720 Dow AgroSciences, Volcane): Pertence ao grupo químico dos organoarsenicais ou arsenicais orgânicos. É registrado no Brasil para algodão, café, cana, citros e áreas não cultivadas, com largo espectro de ação sobre gramíneas e espécies de folhas largas anuais. É usado em pós-emergência, uma vez que a absorção é essencialmente foliar. Em culturas não tolerantes, é aplicado em jato dirigido, sendo esta a modalidade mais utilizada no Brasil, principalmente na cultura do algodão. A dessecação rápida causada pela aplicação deste herbicida indica a destruição de membranas celulares.

REFERÊNCIAS

BEYER JUNIOR, E. et al. Sulfonylureas. In: KEARNEY, P.C.; KAUFMAN, D.D. (Eds.). **Herbicides chemistry, degradation and mode of action.** New York: Marcel Dekker, 1988. p.117-89.

CROTEAU, R. Clomazone does not inhibit the conversion of isopentenyl pyrophosphate to geranyl, farnesyl, or geranylgeranyl pyrophosphate in vitro. P**lant Physiology**, v. 98, p. 1515-17, 1992.

DAN HESS, F. Mode of action of lipid biosynthesis inhibitors (graminicides - ACCase inhibitors). In: PURDUE UNIVERSITY (Ed.). **Herbicide Action Course**. West Lafayette: CRC Press, 1994b. p. 201-16.

DAN HESS, F. Mode of action of photosynthesis inhibitors. In: PURDUE UNIVERSITY (Ed.). **Herbicide Action Course**. West Lafayette: CRC Press, 1994a. p. 85-102.

DEVINE, M.; DUKE, S.O.; FEDTKE, C. **Physiology of herbicide action**. Englewood Clis: Prentice Hall, 1993. 441p.

DIETRICH, H.; JONES, J.C.; LABER, B. Inhibitors of Cellulose Biosynthesis. **Modern Crop Protection Compounds**, v. 1, p. 387-423, 2019.

DUKE, S.O.; KENYON, W.H. Effects of dimethazone (FMC 57020) on chloroplast development. II. Pigment synthesis and photosynthetic function in cowpea (*Vigna unguiculata* L.) primary leaves. **Pesticide Biochemistry Physiology**, v. 25, p. 11-18, 1986.

DURNER, J.; GAILUS, V.; BOGER, P. New aspects on inhibition of plant acetolactate synthase by chlorsulfuron and imazaquin. **Plant Physiology**, v. 95, p. 1144-49, 1991.

FEDTKE, C.; DUKE, S.O. Herbicides. In: HOCK, B.; ELSTNER, E.F., (Eds.). **Plant toxicology**. New York: Marcel Dekker, 2005. p. 247-330.

FERHATOGLU, Y.; AVDIUSHKO, S.; BARRET, M. The basic for safening of clomazone by phorate insecticide in cotton and inhibitors of cytochrome P450s. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 81, p. 59-70, 2005.

FERHATOGLU, Y.; BARRET, M. Studies of clomazone mode of action. **Pesticide Biochemistry and Physiology,** v. 85, p. 7-14, 2006.

HARTZLER, R.G.; FAWCETT, R.S.; TABER, H.G. Effects of trifluralin on corn (Zea mays) growth and nutrient content. **Weed Science**, v. 38, p. 468-70, 1990.

HEAP, I. **International Survey of herbicide resistent weeds**, 2019. Disponível em: <http://www.weedscience.org/In.asp>. Acesso em: 01/05/2019.

HESS, D.; BAYER, D.E. Binding of the herbicide triuralin to *Chlamydamonas agellar tubulin*. **Journal of Cell Science**, v. 24, p. 351-60, 1977.

JAREMTCHUK, C.C. et al. Efeito de sistemas de manejo sobre a velocidade de dessecação, infestação inicial de plantas daninhas e desenvolvimento e produtividade da soja. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 30, p. 449-55, 2008.

KREMER, R.J.; MEANS, N.E. Glyphosate and glyphosate-resistant crop interactions with rhizosphere microorganisms. **European Journal of Agronomy**, v. 31, p. 153-61, 2009.

LIGNOWSKI, E.M.; SCOTT, E.G. Effect of trifluralin on mitosis. **Weed Science**, v.20, p. 267-70, 1972.

PARKA, S.J.; SOPER, O.F. The physiology and mode of action of the dinitroaniline herbicides. **Weed Science**, v. 25, p. 79-87, 1977.

REAM, J.E. et al. EPSP synthase: binding studies using isothermal titration microcalorimetry and equilibrium dialysis and their implication for ligand recognition and kinetic mechanism. **Biochemistry**, v. 31, p. 5528-34, 1992.

RIDLEY, S.M.; MCNALLY, S.F. Effects of phosphinothricin on the isozymes of glutamine syntethase isolated from plant species which exhibit varying degrees of susceptibility to the herbicide. **Plant Science,** v. 39, p. 31-36, 1985.

RODRIGUES, B.N.; ALMEIDA, F.S. **Guia de herbicidas**. Londrina: Edição dos autores, 2018.

SCHLOSS, J.V. Acetolactate synthase, mechanism of action and its herbicide binding site. **Pesticide Science**, v. 29, p. 283-292, 1990.

SENSEMAN, S.A. **Herbicide Handbook**. 9 ed. Lawrence: Weed Science Society of America, 2007.

TAKANO, H.K. et al. Reactive oxygen species trigger the fast action of glufosinate. **Planta**, v. 249, p. 1837-49, 2019.

TATENO, M.; BRABHAM, C.; DEBOLT, S. Cellulose biosynthesis inhibitors- a multifunctional toolbox. J**ournal of Experimental Botany**, v. 67, p. 1-10, 2016.

UNIVERSITY OF MINNESOTA. **Cultural and chemical weed control in field crops**. St. Paul: University of Minnesota, Extension service, 2009.

VELINI, E.D. et al. **Glyphosate**. Botucatu: FEPAF, 2009.

VIDAL, R.A. **Herbicidas: mecanismos de ação e resistência de plantas**. Porto Alegre: Ed. do autor, 1997.

YUN, M.S. et al. Cytochrome P-450 monooxygenase activity in herbicide-resistant and -susceptible late watergrass (*Echinochloa phyllopogon*). **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v.83, p. 107-14, 2015.

ZABLOTOWICZ, R.M.; REDDY, K.N. Impact of glyphosate on the Bradyrhizobium

japonicum symbiosis with glyphosate-resistent transgenic soybean: a minireview. **Journal of Environmental Quality**, v. 33, p. 825-831, 2004.

ZOBIOLE, L.H.S. et al. Glyphosate affects photosynthesis in first and second generation of glyphosate-rresistant soybeans. **Plant and Soil,** v. 336, p. 251-265, 2010a.

ZOBIOLE, L.H.S. et al. Water use efficiency and photosynthesis of glyphosate-resistant soybean as aected by glyphosate. **Pesticide Biochemistry Physiology**, v. 97, p. 182-193, 2010b.

ZOBIOLE, L.H.S. et al. Glyphosate reduces shoot concentrations of mineral nutrients in glyphosate-resistant soybeans. **Plant and Soil**, v. 328, p. 57-69, 2010c.

CAPÍTULO 7

FORMULAÇÕES E MISTURAS DE HERBICIDAS EM TANQUE

Rone Batista de Oliveira[1]
Dionísio Luiz Pisa Gazziero[2]
Antônio Augusto Corrêa Tavares[3]
João Victor de Oliveira[3]
Marcelo Bressan[4]
Arthur Arrobas Martins Barroso[5]

[1]Engenheiro Agrônomo, Professor, Doutor. Universidade Estadual do Norte do Paraná-UENP, Campus Luiz Meneghel, Bandeirantes/PR. [2]Engenheiro Agrônomo, Doutor. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA – EMBRAPA SOJA, Londrina/PR. [3]Engenheiro Agrônomo, Mestrando em Agronomia. Universidade Estadual do Norte do Paraná-UENP, Campus Luiz Meneghel, Bandeirantes/PR. [4]Engenheiro Agrônomo - Auditor Fiscal Federal Agropecuário - Chefe do Serviço de Fiscalização de Insumos e Sanidade Vegetal -SISV/SFA-PR - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA. [5]Prof. Dr. Universidade Federal do Paraná – UFPR, Setor Agrárias – Curitiba/PR.

1 INTRODUÇÃO

A maioria das regiões de produção agrícola brasileiras são de clima Tropical e Subtropical com condições particulares que favorecem a alta variabilidade espacial dos solos, diversidade de pragas, doenças e plantas daninhas. Assim, é prática comum em culturas agrícolas a aplicação de herbicidas, inseticidas, fungicidas e fertilizantes via foliar, misturados em um mesmo tanque de pulverização. Para as plantas daninhas, essa foi e continua sendo a opção mais barata e eficiente para controlar diferentes espécies e/ou espécies resistentes, um dos maiores problemas da agricultura brasileira.

A mistura de agrotóxicos em tanque é realidade no campo. Em uma pesquisa realizada por Gazziero (2015), em 17 estados do Brasil, constatou-se que 97% dos entrevistados utilizavam misturas em tanque e que, em 95% destas, utilizavam-se entre dois a cinco produtos. Hoje, com a Instrução Normativa n. 40, de 11 de outubro de 2018 (MAPA), a mistura em tanque é regulamentada e permitida em receituário agronômico desde que assinada por um Engenheiro Agrônomo. Mesmo com essa liberação, os agricultores e técnicos carecem de informações em relação aos procedimentos de preparo, a sequência de adição dos produtos, os riscos de incompatibilidades físicas e químicas e da interferência de misturas no controle fitossanitário. Parte destas dúvidas decorre das inúmeras possibilidades de combinações possíveis de serem realizadas e dos poucos estudos e evidências técnicas e científicas sobre o assunto.

A mistura de múltiplos produtos e de compostos de diferentes tipos de formulações mostra uma realidade no cenário agrícola: a de que as caldas dentro do tanque de pulverização podem apresentar alta concentração e/ou diferentes condições, que exigirão cada vez mais de máquinas com sistemas eficientes de agitação da calda, profissionais aptos a recomendar técnicas de aplicação e pontas de pulverização que atendam adequadamente a este cenário de muita complexidade e de pouca informação.

Além do princípio ativo, em uma mistura, os produtos podem ser de diferentes fabricantes, origem, matéria-prima, tipos de formulação e que, por natureza química, poderão produzir incompatibilidades físicas e/ou químicas. Quando realizada sem os devidos cuidados, pode gerar problemas, tais como: deposição no fun-

do do tanque (decantação), formação de grumos, coloides em suspensão na forma de agregados (floculação), separação de fases e insolubilidade. Como consequência geral, ocorrem a obstrução do sistema de pulverização, acúmulo e entupimento de mangueiras, saturação dos filtros e entupimento das pontas de pulverização, além da desuniformidade de concentração dos produtos durante o processo de pulverização. Agricultores e técnicos envolvidos na pesquisa realizada por Gazziero (2015) confirmaram que problemas dessa natureza ocorrem com frequência no campo.

Entretanto, quando realizada de forma correta, tem como consequências alguns benefícios operacionais, como redução da quantidade de aplicações para manejo e, por consequência, menor número de entradas dos maquinários nas áreas, redução da compactação do solo, uso racional dos recursos hídricos, redução no tempo de exposição do aplicador aos produtos fitossanitários, maior conservação dos equipamentos pela redução das horas de funcionamento e potencial redução de custos.

Assim, antes da mistura, algumas perguntas devem ser respondidas. Como foi decidida a necessidade de uso do herbicida? Quão qualificadas e treinadas são as pessoas que farão o uso? Além disso, deve-se descartar a possibilidade de misturas de princípios básicos de grupos químicos que apresentam antagonismo e que, muitas vezes, são negligenciados. Neste capítulo, trataremos dos principais fatores que interferem nas misturas em tanque, envolvendo tipos de formulações dos herbicidas, sequência de adição dos produtos, preparo da calda e abastecimento, sistemas de agitação, armazenamento e resultados de pesquisa da interação da mistura de herbicidas e o impacto nos processos de pulverização.

2 PRINCIPAIS TIPOS DE FORMULAÇÕES DOS HERBICIDAS

A qualidade e a eficácia da aplicação de herbicidas podem sofrer interferência de diversos fatores, dentre os quais se destacam as condições meteorológicas, pulverizador, operador, tecnologia utilizada, ingrediente ativo (i.a.) e formulações dos agrotóxicos (FOLONI; CARBONARI, 2009). A formulação diz respeito à forma física com a qual o ingrediente ativo do agrotóxico é apresentada ao mercado.

Existem hoje 2.207 produtos formulados de agrotóxicos registrados para aplicações terrestre e aérea, envolvendo 309 ingredientes ativos e 65 tipos de formulações (BRASIL, MAPA, 2019). A quantidade de formulações registradas sofreu alterações a partir de setembro de 2019, quando algumas formulações foram excluídas, como a Isca concentrada (CB) e Aerossol (AE), outras adicionadas, como a Tela/Saco formulado (LN), e outras substituídas, seguindo o Ato N°30 de 29 de abril de 2019 (BRASIL, MAPA, 2019).

O agrotóxico já formulado caracteriza-se por produtos geralmente compostos de vários elementos que, juntos, caracterizarão a formulação química. No desenvolvimento do produto, o ingrediente ativo (líquido ou sólido) é a parte biologicamente ativa, que se une aos ingredientes inertes, que podem ser classificados em solventes ou coadjuvantes.

Os ingredientes inertes são adjuvantes classificados como surfactantes (dispersores e agentes molhantes), solventes, emulsificantes, antiespumantes, estabilizadores, antimicrobianos, anticongelantes, pigmentos/corantes e reguladores de pH (GOUGE, 2010).

Quando um produto fitossanitário está sendo desenvolvido, as propriedades do ingrediente ativo normalmente determinam a escolha da formulação que pode ser usada para produzir um produto consistente e comercializável (WOODS et al., 2015). Outros fatores que são levados em consideração na escolha da formulação, não tão determinantes, porém restritivos, são: o custo, modo de aplicação, facilidade de manuseio e dosagem, solubilidade física durante a vida de prateleira, segurança no transporte, uso, aplicação, fitotoxidade, risco ao meio ambiente, condições climáticas dos locais de aplicação e eficiência do produto (RAETANO, 2013).

A formulação de um produto fitossanitário cumpre o objetivo de permitir melhor dispersão do formulado no veículo, além de torná-la mais adequada para uso, aumentar a eficiência do ingrediente ativo, reduzir a toxicidade, reduzir a fotodecomposição e volatilização, proporcionar maior estabilidade ao i.a. e facilitar o manuseio (quando possível). A maioria das formulações de herbicidas são desenvolvidas para serem solubilizadas em água; portanto, é fundamental entender o principal meio de solubilidade dos herbicidas na mistura em tanque. A água é o solvente universal no preparo de caldas e pode influenciar na calda final em função da qualidade e da quantidade. A qualidade da água está relacionada com as características

físicas e químicas, tais como o pH, solubilidade, concentração de cátions, dureza, turbidez e temperatura. Todas estas características podem ser alteradas pela fonte de captação de água (rios, açudes, poços artesianos) e estação do ano (inverno, outono, primavera e verão).

São comuns relatos de incompatibilidade dos produtos e de dificuldade de solubilidade nas estações mais frias do ano, principalmente na região Sul do Brasil, devido a mudanças de temperatura da água. Estudos de Devkota et al. (2016) apresentam a redução do controle de alguns herbicidas e de misturas em função da temperatura da água de 5° e 56° C (Tabela 1). Muitos herbicidas perdem a solubilidade em água fria ou muito quente, o que pode trazer a necessidade de aquecimento ou de resfriamento da água de pulverização antes ou durante a aplicação.

Tabela 1. Redução do controle de herbicidas em função da temperatura da água.

Herbicidas	**Temperatura da água (°C)**			
	5	22	38	56
2,4-D Choline	✗	✓	✓	✗
Glufosinate (Liberty®)	✗	✓	✓	✗
Mesotrione (Calisto®)	✗	✓	✓	✗
Glyphosate + dicamba	✗	✓	✓	✗

✗=controle reduzido em algumas espécies. ✓= controle não reduzido nesta temperatura.

Fonte: Devkota et al.(2016).

A quantidade de água utilizada no preparo ou na solubilidade influencia diretamente a concentração do produto na calda final da pulverização. O mau dimensionamento da quantidade de água pode expressar a redução de eficiência dos herbicidas, além do risco de incompatibilidade. O volume e a temperatura da água e a presença dos cátions de Ca^{+2}, Mg^{+2}, Zn^{+2}, Fe^{+3} e fertilizantes foliares são os principais fatores que aumentam o risco da inativação dos herbicidas. Na Figura 1, está apresentado um levantamento das principais formulações utilizadas nos herbicidas.

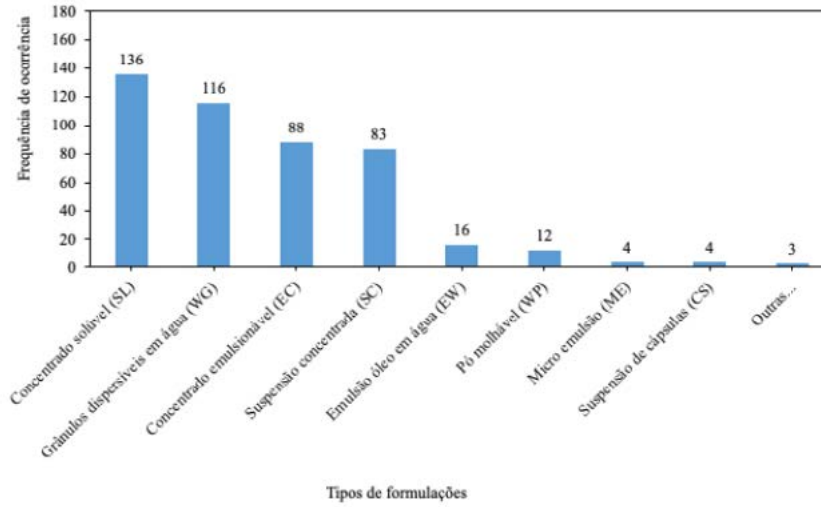


Figura 1. Principais tipos de formulações utilizadas nos herbicidas.
Fonte: Agrofit (abr. 2019).

De maneira específica, os herbicidas compõem 34,39% dos produtos agrotóxicos, com 759 produtos registrados no MAPA. O concentrado solúvel (SL) é a formulação com mais registros (136) devido ao ingrediente ativo glyphosate (em mistura ou não com outro i.a.), ser o herbicida com mais de 60 registros nessa formulação, ou seja, responsável por 44% dos herbicidas formulados como SL. As classes dos herbicidas apresentam como principais formulações: os concentrados solúveis (SL), os concentrados emulsionáveis (EC), as suspensões concentradas (SC), emulsão de óleo em água (EW), grânulos dispersíveis em água molháveis (WG) e pós molháveis (WP).

2.1 Concentrados solúveis – SL.

Segundo a norma NBR 12679:2018, o concentrado solúvel é definido como uma formulação líquida límpida a opaca para aplicação sob forma de solução do i.a., após a diluição em água. Como pode ser visto na Figura 2c, quando diluído, não é possível diferenciar o soluto do solvente.

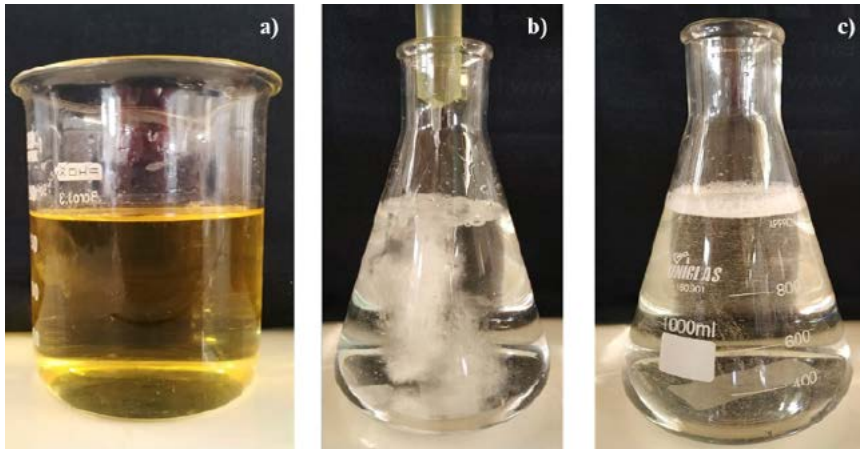


Figura 2. Herbicida SL produto comercial puro (a), em processo de diluição (b) e após a agitação (c).
Fonte: NITEC/UENP, Bandeirantes-PR.

A principal característica que o i.a. deve possuir para ser formulado em SL é ser de alta solubilidade em água, o que limita a quantidade de produtos formulados em soluções. Tais moléculas possuem características parecidas com as do solvente, gerando uma calda com baixo molhamento e interação com a superfície foliar, das culturas ou das plantas daninhas. Devido a isso, em geral as formulações contêm surfactantes e umectantes para aumentar o desempenho do i.a. Devido à grande quantidade de aditivos presentes no SL e pela sua alta solubilidade em água, recomenda-se colocar estes formulados por último na sequência de mistura em tanque. Como, por exemplo, os produtos à base de glyphosate, que possuem altas quantidades de aditivos e comumente utilizados com altas doses, maiores que 3 L ha^{-1}, as chances de incompatibilidades, se estes produtos forem adicionados primeiro ao tanque de pulverização, são grandes.

Dentre as principais vantagens destas formulações está a alta solubilidade em água, não necessitando de alta agitação no tanque, pois não ocorre separação de fases. Por se tratar de uma solução, não ocorre entupimento de filtros e de pontas de pulverização. A menor atividade biológica e as características de qualidades de aplicação ruins são desvantagens do uso desta formulação. Por isso, são extrema-

mente dependentes dos aditivos e do uso de adjuvantes surfactantes, que reduzem a tensão superficial e aumentam a interação produto-alvo (HAZRA et al., 2017).

2.2 Concentrado emulsionável – EC

Segundo a norma NBR 12679:2018, podemos definir as formulações EC como: formulação líquida e homogênea para aplicação na forma de emulsão, após diluição em água (Figura 3c). Emulsão é uma mistura de gotas suspensas de um líquido em outro. O ingrediente ativo é dissolvido em um solvente à base de óleo e depois diluído em água. Quando dissolvidos em água, a calda passa a ter uma aparência leitosa (WOODS et al., 2015).

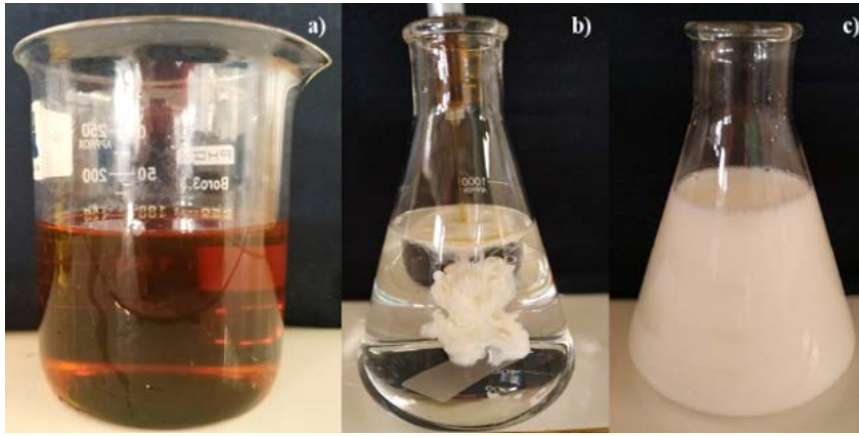


Figura 3. Herbicida EC: produto comercial (a), em processo de diluição (b) e após agitação (c).
Fonte: NITEC/UENP, Bandeirantes-PR.

Os i.a. comumente formulados como EC, são líquidos e possuem alta solubilidade em óleo, sendo necessária a adição de emulsificantes, aditivos que permitem a mistura de moléculas hidrofílicas e lipofílicas, impedindo a separação das fases e aumentando a dispersão das gotículas. Além dos emulsificantes, a formulação EC apresenta alta quantidade de solventes voláteis extremamente agressivos, que po-

dem ser nocivos ao aplicador e também tornando a formulação potencialmente causadora de fitotoxidade. Os solventes, muitas vezes, conseguem derreter plásticos e borrachas, causando danos aos pulverizadores.

A solubilidade em água desta formulação é alta, não necessitando de cuidados especiais no preparo da calda. Pode apresentar problemas com a baixa temperatura da água, indicados pela formação de cristais (CRODA CROP CARE, 2019). A separação de fases entre óleos e água é um processo de natureza química, e para que ocorra uma mistura homogênea, é necessária a utilização de emulsificantes, proporcionando diferentes graus de emulsão aos óleos comercializados. Os óleos utilizados na pulverização agrícola possuem diferentes qualidades de emulsificantes, podendo ocorrer separação de fase. Esta separação é um grande alerta para pulverizações com óleos de baixa emulsão, porque podem proporcionar grande variabilidade de concentração e distribuição de ativos na área devido à tendência de o óleo separar e migrar para a superfície e, com isso, carregar os ativos que tenham afinidade com ele. Também vale ressaltar que o orifício de sucção da calda pela bomba fica no fundo do tanque e que os i.a. que se misturam com o óleo podem ser os últimos a serem pulverizados se não ocorrer a agitação adequada da mistura. Em especial para os óleos, existe relação direta entre a capacidade de agitação do sistema e a formação da emulsão.

Figura 4. Exemplo clássico (água-óleo) de separação de fases de natureza química da mistura em tanque com diferentes óleos vegetais comercializados.
Fonte: NITEC/UENP, Bandeirantes-PR.

2.3 Suspensão concentrada – SC

Segundo a norma NBR 12679:2018, a formulação SC é constituída por uma suspensão estável de i.a. em água, a ser aplicada após diluição em água (Figura 5c). A suspensão é uma mistura líquida, formada por partículas sólidas muito pequenas, suspensas em um líquido. Estas partículas não se dissolvem no solvente, portanto é necessária a agitação constante para que a mistura fique homogênea. As partículas não suspensas irão precipitar ou formar grumos que ficarão flutuando na mistura. As suspensões geralmente possuem um aspecto mais opaco, impedindo a passagem de luz (WOODS et al., 2015).

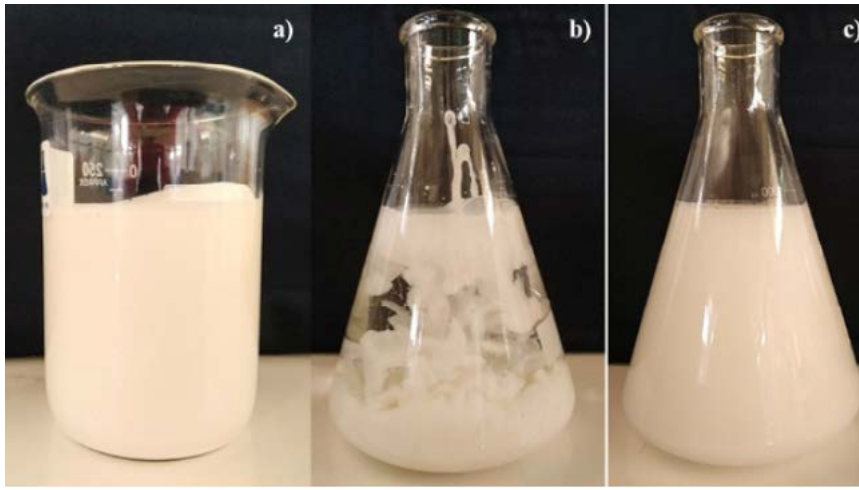


Figura 5. Herbicida SC produto comercial puro (a), em processo de diluição (b) e após a agitação (c).
Fonte: NITEC/UENP, Bandeirantes-PR.

Na suspensão, as partículas são sólidas e tendem a precipitar, e proporcionam separação de fases, podendo ocorrer essa na própria embalagem dos produtos; portanto, antes da utilização de algum produto formulado como suspensão, é necessária uma boa agitação da embalagem para preparar a calda. Pode-se visualizar, na Figura 6, a separação que ocorre em embalagem armazenada por longo tempo.

Figura 6. Produto comercial com separação de fase de herbicida SC.
Fonte: NITEC/UENP, Bandeirantes-PR.

No preparo da calda de pulverização, como possuem alta viscosidade, podem acumular nas paredes das vidrarias (laboratório) e recipientes de medição e necessitam de agitação para que o i.a. não precipite. A formulação SC surgiu com a proposta de suprir alguns problemas existentes nas formulações sólidas, como os WPs (pó molhável. Por se apresentar na forma líquida, os produtos SC já descartam o uso de balanças e eliminam o risco de poeira, tornando-se mais seguros. Os SCs permitem um acréscimo de dispersantes e adjuvantes, facilitam a homogeneização da calda e aumentam o efeito biológico quando comparados com os WPs (GREEN et al., 2007).

2.4 Emulsão de óleo em água – EW

Formulação líquida heterogênea, constituída por uma solução de i.a. em um líquido orgânico disperso com glóbulos finos em uma fase aquosa contínua. Como a formulação EC possui grande quantidade de solventes nocivos, sendo extremamente nocivos para o ambiente e com alta fitotoxidade às culturas, buscou-se por alternativas que não utilizassem tais aditivos. Com isso, surgiu a emulsão que não possui os óleos como fase contínua, mas, sim, a água. A formulação EW apre-

senta-se como mais segura ao ambiente, por não utilizar solventes orgânicos voláteis, o que torna mais segura a fabricação, por não utilizarem solventes inflamáveis, no transporte e no manuseio do preparo da calda (WARE, 2004).

2.5 Pó molhável – WP

O pó molhável ou WP é a formulação mais antiga no segmento industrial de produtos agrotóxicos, com o dicloro-difenil-tricloroetano, ou mais conhecido como DDT. O WP é uma formulação sólida, na forma de pó (Figura 7a), para aplicação sob a forma de suspensão após a dispersão em água (Figura 7c), de acordo com a norma NBR 12679:2018 (ABNT, 2018). Os ingredientes básicos dessa formulação são o ativo (sólido), dispersante (aniônico) e o agente umectante (GOUGE, 2010). A vantagem desta formulação é a possibilidade de compactar altas concentrações de i.a., porém a agitação precisa ser constante no tanque de pulverização para não ocorrer separação de fases. Filtros e pontas podem ser bloqueados por sólidos suspensos, e a medição em peso pode ser perigosa sem a utilização de EPI por conta dos resíduos que a poeira dessa formulação pode realizar (WOODS et al., 2015).

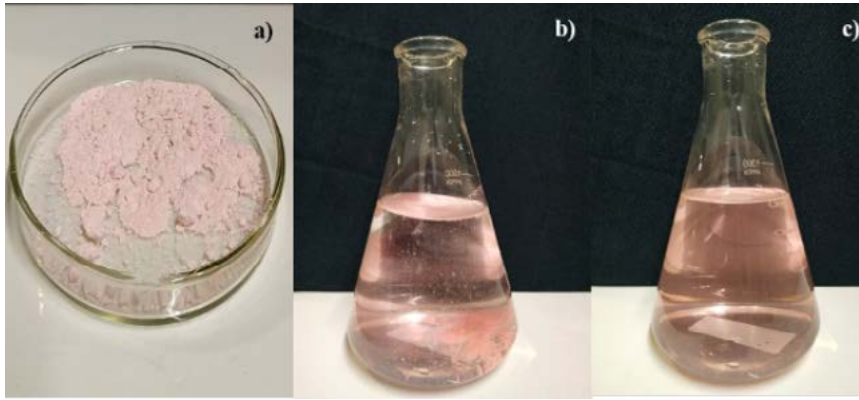


Figura 7. Herbicida WP: produto comercial (a), em processo de diluição (b) e após agitação (c).
Fonte: NITEC/UENP, Bandeirantes-PR.

2.6 Grânulos dispersíveis em água – WG

O WG ou Grânulo dispersível em água é uma formulação sólida (Figura 8a) constituída de grânulos, para aplicação, após desintegração e dispersão em água (Figura 8c), conforme descrito pela ABNT. Possui as mesmas características dos pós molháveis, só mudando a granulometria (Figuras 9 e 10). Ao contrário do WP, não forma poeira e possui também alto teor de i.a., mas as desvantagens são por ser um processo mais complexo e mais caro, devido à tecnologia necessária (WOODS et al., 2015).

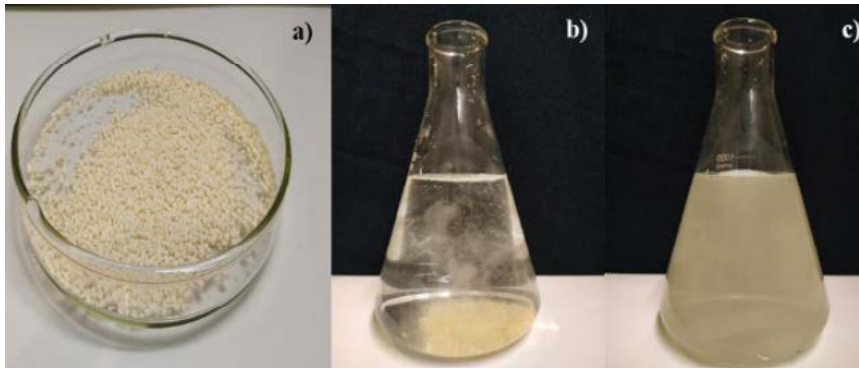


Figura 8. Herbicida WG: produto comercial (a), em processo de diluição (b) e após agitação (c).
Fonte: NITEC/UENP, Bandeirantes-PR.

Figura 9. Herbicida WG com média do tamanho de partículas de 1.882 µm.
Fonte: NITEC/UENP, Bandeirantes-PR.

Figura 10. Herbicida WG com média do tamanho de partículas de 234 µm.
Fonte: NITEC/UENP, Bandeirantes-PR.

2.7 Formulações e Misturas

Como visto acima, as formulações podem ser divididas segundo seu estado físico, como sólidas ou líquidas. As formulações sólidas têm a vantagem no transporte e na armazenagem, devido às embalagens ocuparem menos espaço se comparadas com as formulações líquidas. Outra vantagem é o sistema de descarte, pois não necessita de se realizar a tríplice lavagem, e o resíduo nas embalagens é menor, porém é necessário armazenar em locais adequados. A poeira que ocorre quando se trabalha com formulações solidas de baixa granulometria é perigosa, causando sérios danos ao preparador da calda. Trabalhar com estas formulações, principalmente com WP, exige extrema atenção sobre a qualidade do EPI, e manuseio de forma que promova pouca geração de poeira. Além do fator segurança, a poeira representa perdas econômicas.

Produtos formulados sólidos necessitam de maior atenção no momento de preparo da calda, devido à diluição dificultada e, se não houver a presença de agitação suficiente, podem apresentar sedimentação ou floculação do produto, reduzindo a eficiência da aplicação. Por exemplo, a formulação WP, além de possuir baixa granulometria, apresenta pouca quantidade de emulsificantes e surfactantes, reduzindo a capacidade do produto de se diluir em água e a interação que a calda tem com a superfície das plantas; entretanto, apresenta menor efeito fitotóxico nas culturas (GUPTA, 2004).

Sobre as formulações líquidas, estas facilitam a dosagem do produto, tornam o manuseio mais prático e aumentam a segurança do aplicador. Dosar produtos líquidos é mais simples pelo fato de não ter de usar balança, ausente em muitos lugares. Trabalhar com vidrarias para dosar os produtos torna o procedimento mais simples. Formulações líquidas são de fácil diluição, devido à quantidade de aditivos apresentados, fazendo com que reduza as chances de erro no preparo das caldas. Por se tratar de um líquido, não existe a chance de ocorrer poeira do produto, tornando-o mais seguro.

As formulações antigas, como WP e EC, apresentam uma série de desvantagens de segurança de aplicação e compatibilidade com o meio ambiente. Estas formulações ou apresentam grande quantidade de solventes orgânicos extremamente agressivos, ou são de alto risco no preparo da calda, o que fez com que os químicos buscassem novas alternativas, as formulações WG e EW. Observa-se que as formulações apresentam diferentes níveis de solubilidade (Figura 11), necessitando de atenção com as de menor solubilidade na agitação de calda, escolha de filtros e pontas de pulverização. Cuidados simples podem ser citados, tais como acionar o sistema de agitação no momento do preparo de calda, observar dentro do tanque de pulverização a agitação e/ou o turbilhonamento da mistura. Na aplicação de uma única formulação, é fácil de prever os problemas e os cuidados para evitá-los, uma vez que é conhecida a formulação e a sua solubilidade, porém não é muito comum.

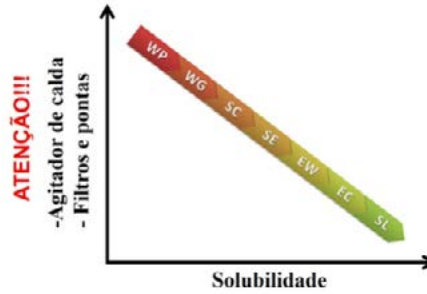


Figura 11. Relação do tipo de formulação com a solubilidade em água e a ATENÇÃO necessária com o sistema de agitação de calda e com os componentes do sistema de pulverização.
Fonte: Oliveira et al. (2017).

3 MISTURAS EM TANQUE

A mistura em tanque corresponde à associação dos produtos fitossanitários e afins dentro do tanque de pulverização, devendo ser realizada imediatamente antes da aplicação (GAZZIERO, 2015). Recentemente, essa mistura foi legalizada pela instrução normativa de número 40 (IN 40, 11 de outrubro de 2018), atribuindo ao engenheiro agrônomo a responsabilidade de sua recomendação. Neste caso, a receita agronômica deverá apresentar informações sobre a incompatibilidade de produtos em campo específico da via. Ainda segundo a norma, a secretaria da defesa agropecuária coordenará a elaboração de manuais técnicos para subsidiar a emissão destas receitas. Porém quais são as possiveis interações entre os produtos? Essa associação pode gerar diferentes efeitos: o aditivo, quando o efeito da mistura é semelhante ao dos produtos aplicados individualmente; o sinérgico, quando um produto melhora a eficácia do outro; e o antagônico, quando um produto causa redução na eficácia do outro (QUEIROZ; MARTINS; CUNHA, 2008).

As interações físicas das misturas estão relacionadas aos ingredientes inertes dos produtos fitossanitários, como as formulações e os solventes. Entretanto, a interação química está associada com a molécula dos mesmos, sendo necessário o conhecimento de possíveis interações entre as misturas com produtos de diferentes formulações e ingredientes ativos (PETTER et al., 2013). Em pesquisa realizada por Oliveira et al. (2017) sobre as compatibilidades e incompatibilidades físico-químicas de misturas em tanque, verificou-se que mais de 50% das misturas testadas para a cultura de soja e milho não apresentaram incompatibilidade física; entretanto, para a cultura do milho, quase 20% foram incompatíveis e 26% requerem atenção e cuidados.

As incompatibilidades físicas e químicas de uma mistura inadequada comprometem a homogeneidade dos diferentes ativos contidos na calda final, podendo obstruir os sistemas de filtragem e comprometer a vazão ou a formação do jato de pulverização, além de proporcionar variabilidade de produtos ou concentração na distribuição ao longo do deslocamento ou no tempo de pulverização da máquina e reduzir a eficiência biológica dos produtos. Alguns exemplos de incompatibilidades físicas e químicas estão apresentados nas Figuras 12, 13 e 14. Na Figura 12ª, observa-se a separação de fases, na qual um sólido (WG) se separa por sedimentação no

fundo do balão do líquido (SC), e na Figura 12b a incompatibilidade física é observada pela formação de grumos causada pela inibição de dispersão adequada e pela estabilidade química dos produtos misturados.

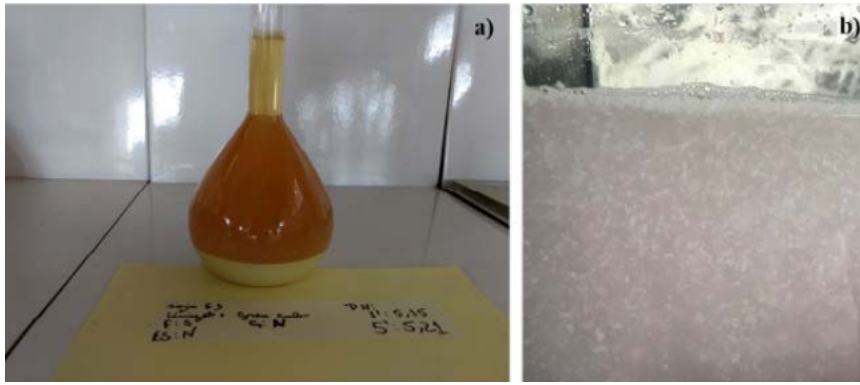


Figura 12. Separação de fases (a) e floculação (b) de misturas em tanque pela ausência de agitação.
Fonte: NITEC/UENP, Bandeirantes-PR.

Na Figura 13, estão demonstrados alguns casos de incompatibilidade físico-química que proporcionaram obstrução total dos filtros das pontas de pulverização. Observou-se baixa solubilidade devido à alta concentração de produtos e à baixa quantidade de água, visando a reduzir a taxa de aplicação. Neste aspecto, a escolha das pontas de pulverização, baseado somente nos critérios de tamanho de gotas e no volume pulverizado, exigirá ainda mais experiência para enfrentar os novos desafios de redução de taxa de aplicação, melhor uniformidade de formação de gotas e, principalmente, de caldas de pulverização com baixa solubilidade oriundas das diferentes misturas em tanque.

Figura 13. Incompatibilidade física da mistura de herbicidas e adubo foliares e o efeito de entupimento de filtros de pontas de pulverização.
Fonte: NITEC/UENP, Bandeirantes-PR.

Outras indicações de incompatibilidade podem ser visualizadas no final da pulverização por meio de acúmulos de resíduos no fundo do tanque de pulverização (Figura 14) e nos componentes do pulverizador, por exemplo em mangueiras, filtros, ponta de pulverização e, principalmente, nos pontos de acúmulos da máquina (Figura 15). A limpeza da máquina, após o término da pulverização, é essencial por conta do acúmulo dos resíduos consequentes das incompatibilidades dos produtos. Boas práticas no uso dos maquinários indicam que a limpeza do circuito hidráulico e do tanque de pulverização de misturas de herbicidas ou incompatibilidade é mais fácil de remoção no instante e será muito complexa após 24 horas da máquina contaminada. Alguns trabalhos sugerem que essa lavagem seja realizada de maneira semelhante às embalagens de agrotóxicos. Ou seja, que o maquinário seja lavado três vezes logo após uma pulverização.

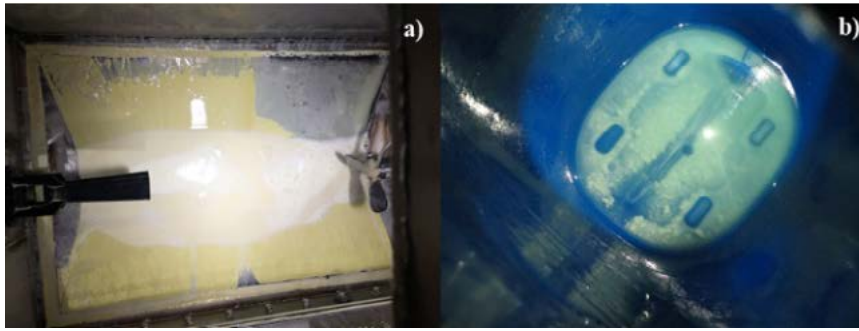


Figura 14. Sedimentação de produtos no fundo do tanque do simulador de misturas (a) e do tanque do pulverizador (b).
Fonte: NITEC/UENP, Bandeirantes-PR.

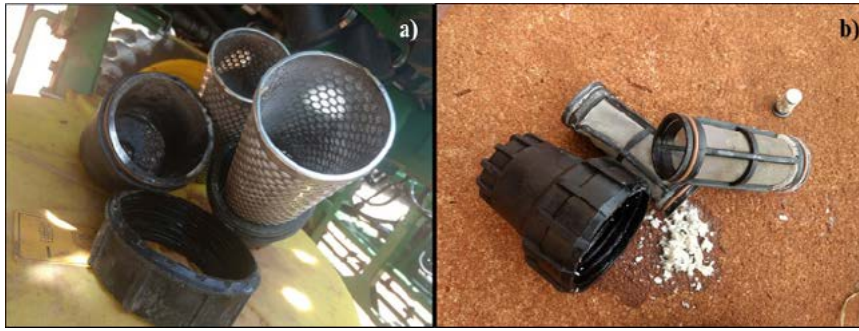


Figura 15. Resíduos de minerais de argila nos filtros de sucção (a) e incompatibilidade de herbicidas nos filtros de linha da barra de pulverização (b).
Fonte: NITEC/UENP, Bandeirantes-PR.

Importante observar que a mistura em tanque não aumenta a capacidade operacional dos pulverizadores. Capacidade operacional é uma expressão matemática definida para expressar a relação de área por tempo e determinada pelos parâmetros dimensionais da máquina, tais como tamanho do tanque, largura da barra, velocidade operacional e os tempos gastos na manutenção, limpeza, manobras, paradas, calibração, regulagens e abastecimento, dentre outros.

As consequências vantajosas e mais aceitas da mistura em tanque são a

maior flexibilidade, otimização do tempo e do trabalho, oportunidade para realizar correção foliar simultânea à aplicação da mistura de herbicidas e ampliação do espectro de controle, economia de água e combustível.

No entanto, uma mistura incompatível pode gerar grandes problemas. Pode causar danos ao equipamento, tempo de inatividade, danos às plantas desejáveis e ineficácia química. A incompatibilidade pode alterar a composição física e química das soluções e neutralizar o efeito isolado e o conjunto dos produtos. Quando realizada sem os devidos cuidados, a mistura pode gerar problemas, tais como de deposição no fundo do tanque (decantação), floculação, formação de grumos, separação de fases e insolubilidade. A consequência é geralmente a obstrução do sistema de pulverização, com entupimento das mangueiras, saturação dos filtros principais, filtros de linha, filtros de pontas e entupimento das pontas de pulverização, além de aumentar a variabilidade de concentração dos produtos durante o processo de pulverização.

Entretanto, as incompatibilidades físicas visuais são indicativos de atenção ou de risco e não garantem que as misturas serão eficientes ou ineficientes agronomicamente, ou risco de fitotoxidade e/ou de toxicidade a animais de sangue quente.

4 LEGISLAÇÃO SOBRE A MISTURA EM TANQUE NO BRASIL

Até meados dos anos de 1980, as indicações técnicas geradas pela indústria e pela academia traziam as recomendações sobre as misturas de produtos em tanque. A partir de abril de 1985, todas as recomendações sobre misturas foram retiradas das instruções de uso, por orientação constante do oficio DIPROF/SDSV 198/85 encaminhado pelo Ministério da Agricultura aos fabricantes. Ficou então o entendimento de que a mistura em tanque havia sido proibida. Dessa data em diante, inúmeras ações, moções, reuniões, debates em congressos e seminários científicos foram realizados, na tentativa de discutir e de normatizar o assunto. Em 1995, foi publicada a portaria n. 67, dando novamente a possibilidade de as empresas incluírem nos registros as recomendações sobre misturas em tanque. Segundo LIMA (1997), a base da Portaria n. 67/95 era a regulamentação americana, editada desde

1982 pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América-EPA, e em vigor até então. Em alguns itens, a regulamentação brasileira era até mais rigorosa que a americana.

Em março de 2000, foi instaurado um Inquérito Civil Público pelo Ministério Público do Distrito Federal, por iniciativa do IBAMA, dando início a um processo que tinha por objetivo a revogação da referida portaria, o que acabou acontecendo em julho de 2002, pela Instrução Normativa n. 46, (IN), determinando novamente a retirada de recomendações de misturas em tanque dos rótulos e das bulas dos produtos. Continuaram então as reivindicações para que esse assunto fosse normatizado, enquanto eram feitas discussões sobre, se de fato, a prática da mistura de tanque era ou não proibida. Em 2011, um estudo jurídico, encomendado pela Associação Brasileira de Defensivos Genéricos (AENDA), concluiu que as misturas em tanque não eram proibidas e que podiam ser praticadas pelo agricultor, sob sua responsabilidade. No entanto, é preciso entender que qualquer agrotóxico só pode ser receitado por um profissional legalmente habilitado, e os produtos só poderão ser prescritos com observância das recomendações de uso aprovadas em rótulo e bula, conforme estabelece o Decreto n. 4.074/02.

Assim, mesmo não sendo proibida no campo, a mistura em tanque não podia ser prescrita em uma receita agronômica. Embora essa prática estivesse no cotidiano do campo com o passar do tempo, as informações de fontes seguras sobre misturas em tanque foram escasseando até chegar à falta total delas. Em 2012, um grupo de trabalho composto por instituições públicas e privadas, como a EMBRAPA, ESALQ, SINDIVEG, AENDA e ANDEF, voltaram a estudar o assunto e as legislações internacionais, chegando a propor uma sugestão de Instrução Normativa na Câmara Setorial de Soja do MAPA, que a encaminhou ao CTA, órgão que reúne os ministérios que respondem pelo registro de produtos no Brasil. Paralelamente, as discussões continuavam, especialmente no Paraná, onde essa proposta de Instrução Normativa (IN) foi aprimorada pelo setor produtivo, pelas entidades de classe ligadas à agronomia e pelos órgãos do governo, que as reenviaram ao governo federal. Finalmente, em 11 de outubro de 2018, foi publicada pelo MAPA a Instrução Normativa n. 40, fruto do Acordo de Cooperação Técnica firmado entre a Secretaria de Defesa Agropecuária – SDA/MAPA; e o Conselho Federal de Engenharia e Agronomia – CONFEA. Em seus seis artigos, descritos abaixo, a IN 40 voltou a possibilitar

as misturas de agrotóxicos no campo.

Art. 1º Estabelecer regras complementares à emissão da receita agronômica prevista no Decreto n. 4.074, de 04 de janeiro de 2002, no que tange ao exercício profissional e eficiência agronômica na aplicação dos agrotóxicos e afins.

Art. 2º A receita, específica para cada cultura ou problema, deverá conter, complementarmente ao que determina o art. 66 do Decreto 4.074, de 04 de janeiro de 2002:

I - nome do(s) produto(s) comercial(ais) que deverá(ão) ser utilizado(s) e de eventual(ais) produto(s) equivalente(s) e informações acerca de sua incompatibilidade quando for o caso;

II - cultura agrícola, áreas onde serão aplicados os agrotóxicos e afins, advertências específicas quanto ao intervalo de segurança e para a colheita dos produtos agrícolas.

§1º As informações constantes em rótulo e bula dos agrotóxicos e afins registrados, relativas à mistura em tanque, quando existentes, são de caráter obrigatório, devendo constar na receita agronômica.

§2º Informações sobre incompatibilidade dos agrotóxicos e afins deverão ser dispostas em campo específico da receita, considerando o contexto da recomendação e advertência específica para a aplicação.

Art. 3º É de competência e responsabilidade do Engenheiro Agrônomo a interpretação das recomendações oficiais, visando à elaboração da receita agronômica em consonância com as boas práticas agrícolas e com as informações científicas disponíveis.

Art. 4º A Secretaria de Defesa Agropecuária coordenará a elaboração de manuais técnicos para subsidiar a emissão qualificada da receita agronômica.

Art. 5º Os critérios e procedimentos que constam nesta norma são passíveis de fiscalização pelos órgãos estaduais e Distrital de Defesa Agropecuária integrantes do Sistema Unificado de Atenção à Sanidade Agropecuária.

Art. 6º Esta Instrução Normativa entra em vigor na data de sua publicação.

Baseado nestas alterações, a recomendação de misturas deve seguir alguns preceitos. Ligados à toxicologia, por exemplo, na mistura de agrotóxicos com diferentes intervalos de segurança, dever-se-á considerar aquele mais restritivo. Quanto à eficiência, a taxa de aplicação deve estar compreendida em intervalo defi-

nido na bula de todos os produtos, como exemplificado na Figura 16a. Em casos que esta informação não existe, ela pode acompanhar as outras recomendações. Porém, se não existe a intersecção entre as taxas de aplicação dos produtos, o que está fora não pode ser recomendado, como mostra a Figura 16b. O mesmo ocorre para outras informações quanto ao tamanho de gotas a ser utilizado (Figura 17).

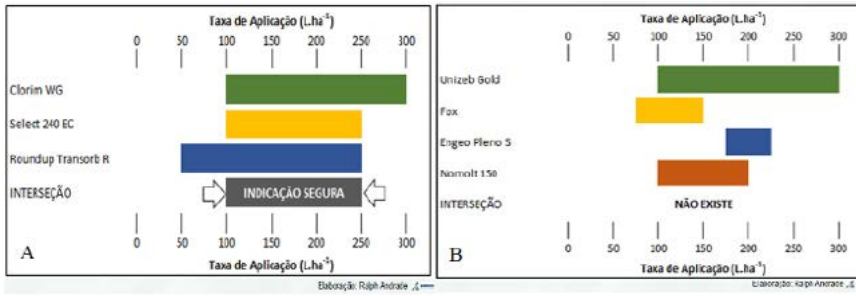


Figura 16. Escolha da taxa de aplicação baseada nas informações de cada agrotóxico aplicados em mistura.

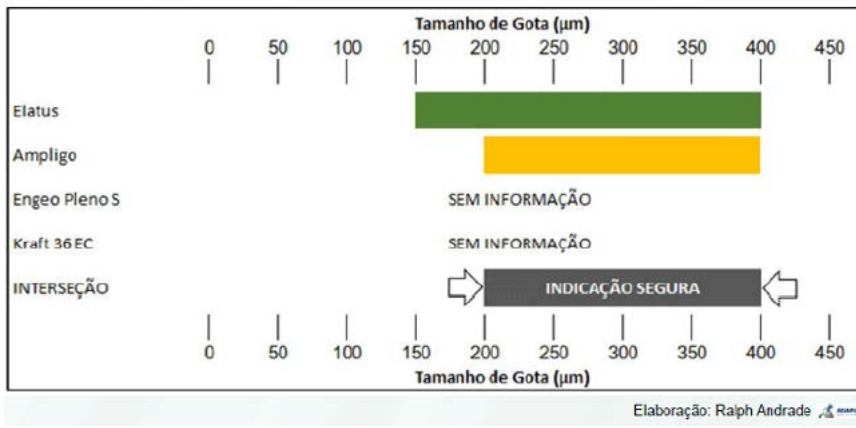


Figura 17. Escolha do tamanho de gotas a ser utilizado na mistura entre agrotóxicos.

5 RECOMENDAÇÕES QUANTO À MISTURA EM TANQUE

5.1 ORDEM DA MISTURA

As misturas são classificadas em dois tipos. A formulada, quando o produto comercial já possui a mistura de ingredientes ativos; e a mistura em tanque, quando são adicionados dois ou mais produtos no tanque do pulverizador (CAMPLI, 2015). É extremamente importante conhecer a sequência ideal específica de cada produto. Em alguns casos, se os produtos serão compatíveis ou não, dependerá da sequência de adição deles no tanque. Esta informação não dispensa a leitura dos rótulos dos produtos e como seguir as recomendações de manuseio pelo técnico responsável. Em caso de dúvida, recomenda-se a realização de uma prova de compatibilidade entre produtos antes da mistura.

Por isso, durante o preparo da mistura, alguns cuidados são necessários para minimizar possíveis incompatibilidades. Entre eles, a sequência de adição dos produtos no tanque, que deve ser realizada de acordo com as formulações, viscosidade e solubilidade de cada produto. A sequência é extremamente importante e pode contribuir para reduzir a ocorrência de formação de grumos, floculação, separação de fases, decantação e insolubilidade. Além disso, a concentração do ingrediente ativo na mistura e as medidas operacionais, como a agitação da calda, são fundamentais para que não ocorram incompatibilidades físicas e químicas (FERREIRA, 2019).

Atualmente, a maioria dos produtos fitossanitários não contém em sua bula orientações de sequência de misturas, o que em nada contribui para a prevenção dos problemas.

Na Figura 18, está apresentada uma sequência de mistura de produtos, obtida a partir do estudo de mais de 300 misturas realizadas em um simulador de tanque de pulverização, para os produtos fitossanitários recomendados para as culturas do milho, soja, batata, café, algodão e hortifruticultura (HF). Observa-se que o acionamento do sistema de agitação do pulverizador é fundamental para proporcionar um turbilhonamento adequado do líquido dentro do tanque no momento do preparo da calda de pulverização.

Figura 18. Sequência de mistura em tanque e a dependência do sistema de agitação para a homogeneidade e a solubilidade da calda de pulverização.
Fonte: Oliveira et al. (2017).

Prioriza-se colocar primeiramente a água em quantidade suficiente para que ocorra o turbilhonamento ou a movimentação do líquido em todas as partes internas do tanque. A recomendação de 1/3, 1/2, 2/3 e 3/4 do volume do tanque não pode ser adotada como regra geral, pois depende do sistema de agitação e do formato do tanque. A origem da água, o pH, as informações de dureza e os minerais de argila devem ser conhecidos, assim como o potencial da mistura em formar espuma. Estas informações são necessárias para a tomada de decisão quanto à adição de um condicionador de calda ou de solubilizante para alterar o pH, melhorar a solubilidade, a compatibilidade e evitar a formação de espumas (antiespumante). Os adjuvantes com funcionalidades de melhoria das características de formação de gotas, espalhamento, adesivos, umectantes, redutores de deriva, risco de fotodegradação e redutores de espuma podem ser adicionados por último, porém foi colocada uma interrogação, pois existem adjuvantes específicos que devem ser adicionados logo após o início, visando a manter estável a formulação.

Quanto aos fertilizantes foliares, existem inúmeras opções oferecidas, pouca informação da composição, doses, desconhecimento de suas formulações e do

risco de incompatibilidade, razão pela qual foi colocado um ponto de interrogação na figura. Atualmente, a maioria dos herbicidas não contém em sua bula orientações de sequência de misturas, as quais poderiam contribuir muito para a prevenção dos problemas.

No preparo de caldas, cada propriedade tem suas particularidades, problemas e soluções específicas que deverão ser analisados e orientados para se evitar e corrigir os erros. Portanto, alguns cuidados básicos são indicados na mistura em tanque:

- Conhecer a aptidão de combinação dos produtos fitossanitários, adjuvantes e fertilizantes foliares disponíveis para aplicação nos diferentes momentos exigidos no manejo da cultura;

- No preparo das caldas, conhecer a sequência ideal de cada produto para a construção da mistura final;

- Utilizar máquinas com dimensionamento correto do sistema de agitação e, se possível, combinar agitação hidráulica e mecânica

Na Figura 19, está demonstrada a importância da sequência e do tipo de formulação na mistura, e observa-se que a adição da formulação SL primeiro, e depois a adição do produto com formulação SC provocou a formação de flóculos na mistura. Observa-se a homogeneidade em outros exemplos, tais como produtos de mesma formulação, como, por exemplo, o 2,4-D e o glyphosate. Em geral, os auxínicos têm menor compatibilidade e devem ser adicionados primeiro, pois os emulsificantes, surfactantes contidos no glyphosate passam a dominar o meio, e o próximo produto adicionado estará condicionado à solução aquosa formada pelo glyphosate, e o risco de incompatibilidade é alto. Outro exemplo importante de sequência de produtos é com o herbicida HEAT®. Se o adjuvante recomendado Dash® não for adicionado após o herbicida, há risco de incompatibilidade com os demais produtos.

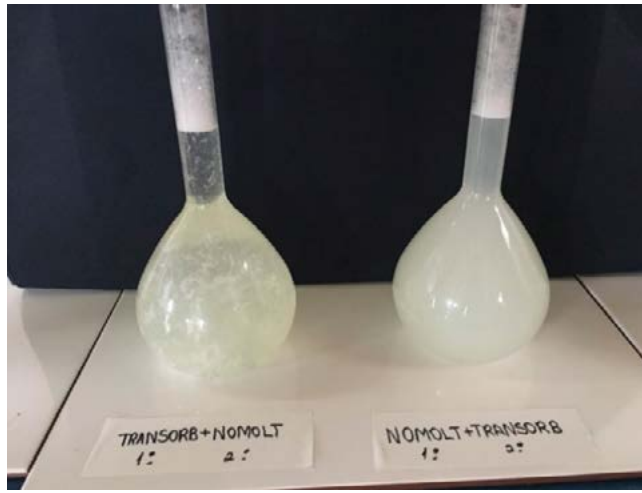


Figura 19. Exemplo da ordem inadequada do tipo de formulação no preparo da calda de Glyphosate Transorb® (SL) e o inseticida Nomolt® (SC).
Fonte: NITEC/UENP, Bandeirantes-PR.

5.2 SISTEMA DE AGITAÇÃO NO TANQUE DOS PULVERIZADORES

O nível de agitação da mistura em tanque depende do tipo de pulverizador. Os pulverizadores costais apresentam baixa agitação, e os demais pulverizadores, caracterizados como acoplados, de arrasto e autopropelidos, apresentam sistemas de agitação hidráulica e/ou mecânica.

A agitação hidráulica é realizada por meio da circulação da calda que retorna para o tanque, comandada por um regulador de pressão, e, portanto, a agitação é dependente do volume de calda pulverizado nas pontas e do que sobrará para retornar ao tanque. Em geral, a mangueira do retorno está na parte superior do tanque e com saída na superfície da calda (Figura 20a). Existem também sistemas pulverizadores acoplados com opções de instalação de agitador mecânico, para complementar e para melhorar a agitação por turbilhonamento, que pode ser acionado por bomba e por motor hidráulico (Figura 20b). Outra alternativa é a agitação hidráulica com adição de bicos acessórios, que potencializam a agitação por meio do princípio

de um tubo de Venturi e devem ser instalados no fundo do tanque, permitindo que bombas pequenas movimentem grandes volumes de líquido com o intuito de proporcionar maior velocidade do fluxo e agitação da calda (Figuras 20c, 20e, 20f, 20g e a 20h).

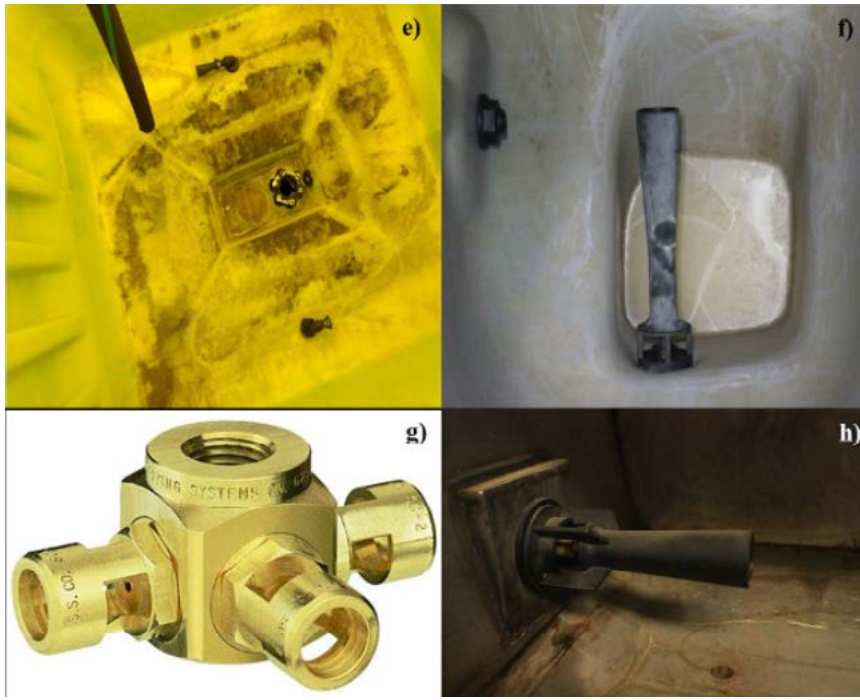


Figura 20. Principais sistemas de agitação dos pulverizadores utilizados no Brasil. **Fonte:** NITEC/UENP, Bandeirantes-PR

A agitação mecânica é realizada por meio de um conjunto de hélices acionado pelo sistema hidráulico e/ou por motor elétrico, também auxiliada por sistemas de quebra-ondas no tanque. O dimensionamento e a combinação correta de agitadores hidráulicos e mecânicos podem contribuir para promover melhor homogeneização da calda de pulverização ou para reduzir o risco de instabilidade da calda.

A ausência de agitação ou de turbilhonamento da água no momento da adição dos produtos pode acarretar na formação de sobrenadantes que potencializam a desuniformidade ou a sedimentação direta dos produtos para o fundo do tanque, com a possibilidade de serem succionados pela bomba.

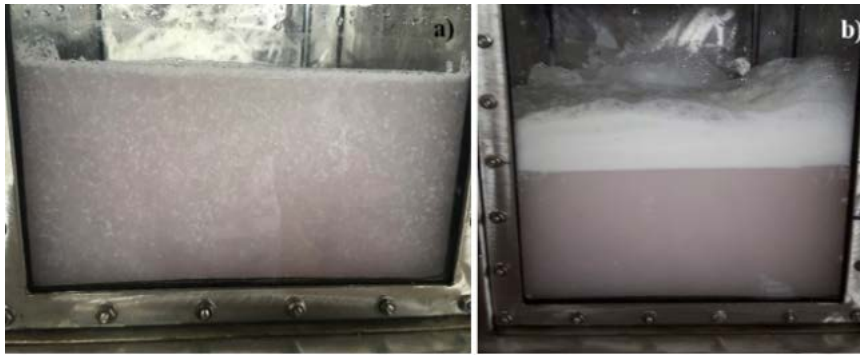


Figura 21. Caldas de pulverização sem agitação (a) e com agitação (b).
Fonte: NITEC/UENP, Bandeirantes-PR.

A agitação mecânica vem como novo recurso para promover o turbilhonamento necessário para homogeneizar a calda de pulverização, porém também tem aumentado a formação de espumas que podem segurar o ingrediente ativo, causando dificuldade de complementar a calda, causar vazamento e atrapalhar na leitura do fluxômetro (Figura 22).

Figura 22. Formação de espumas com diferentes misturas de herbicidas.
Fonte: NITEC/UENP, Bandeirantes-PR.

5.3 SISTEMA DE PREPARO DE MISTURAS EM TANQUE

Os três sistemas operacionais comumente utilizados para preparo de calda e adição no tanque de pulverização são denominados de incorporadores de calda, tanques de pré-mistura e calda pronta e concentrada.

5.3.1 Incorporadores

É um componente que vem de fábrica dos pulverizadores para facilitar a operação de preparo de calda, evitar a subida com produtos até o bocal do tanque, reduzir a contaminação do preparador e possibilitar a tríplice lavagem das embalagens de forma segura (Figura 23). O uso deste componente tem diminuido devido às vantagens operacionais oferecidas aos sistemas de pré-mistura e calda pronta.

Figura 23. Modelos de incorporadores de calda que vêm de fábrica nos pulverizadores. Fonte: Oliveira (2018).

5.3.2 Pré-misturadores

É um sistema de preparo de calda no qual os produtos são diluídos em água, e a maioria contém esguicho e injeção interna de água nas embalagem para realização de tríplice lavagem e bombeamento imediato para o tanque de pulverização. São fabricados em polietileno ou aço inox. É recomendado que tenham algum tipo de sistema de agitação de caldas, sendo neste processo necessário também muita atenção na quantidade de água, porque preparar com baixos volumes pode saturar o sistema e comprometer a solubilidade. Tem sido objeto de muitas melhorias e inovações, e seu uso tem sido crescente.

Figura 24. Sistema de preparo de caldas com pré-misturador em plástico e sem agitação.
Fonte: Oliveira (2018).

Figura 25. Sistema de preparo de caldas com pré-misturador em inox e com sistema de agitação.
Fonte: Oliveira (2018).

Figura 26. Pátio de apoio ao preparo de calda, sistema de pré-mistura e tanque de armazenamento de água limpa.
Foto: Anderson de Jesus (2019).

5.3.3 Calda pronta e calda concentrada

Neste sistema, a calda é preparada em local específico e separada do pulverizador. Poderá ser armazenada em caminhão transportador de calda, para posterior transferência para o tanque de pulverização no momento certo da necessidade. Apresenta a vantagem de reduzir o tempo gasto de deslocamento do pulverizador para abastecimento.

O sistema de calda concentrada, também denominado de "usinagem de calda", consiste em um espaço específico para o preparo de caldas com alta concentração e que será diluída no tanque do pulverizador (Figura 26). O sistema requer um caminhão transportador de calda concentrada e outro para transporte de água ou, simultaneamente, carregar água e diferentes produtos (Figura 27). As vantagens deste sistema são no controle, segurança e operacionalidade no campo. Do ponto de vista físico-químico, pode-se aumentar a probabilidade de risco de incompatibilidade em função da baixa quantidade de água para a solubilidade dos produtos.

Ainda há poucos estudos e evidências técnicas e científicas sobre esses sistemas. Há tendência de muitas melhorias e inovações, e os desafios são as inúmeras possibilidades de combinações possíveis praticadas em campo.

Figura 26. Sistema de calda concentrada, denominado pelo fabricante como "usinagem de calda".
Fonte: Anderson de Jesus (2019).

Figura 27. Operação do sistema de calda concentrada com três tanques de calda de produtos e um tanque de água limpa.
Fonte: Cortesia Solomaq (2019).

5.4 Tabela de misturas em tanque: Estudo de caso

Oliveira et al. (2017) construíram uma Tabela de aptidão de (in) compatibilidade físico-química de misturas em tanque de produtos fitossanitários (Figura 28), sem e com fertilizantes foliares, visando a reduzir a carência de informações e a ampliar as discussões técnicas em relação ao tema, sem caráter de recomendação de mistura nem sequer dos produtos ali apresentados. A pesquisa foi realizada com a preocupação de replicar as práticas de campo quanto ao preparo de caldas e de sistemas de pulverização, envolvendo fundamentos básicos essenciais, tais como: tipos de formulações; turbilhonamento e cisalhamento (força de escoamento do líquido) da calda por sistemas de bombeamento e agitação; temperatura; pH; ordem ideal de misturas; e conceitos de tecnologia de aplicação. O primeiro desafio foi desenvolver um equipamento ou simulador de misturas que atendesse a estes pressupostos, visando a não perder a natureza da praticidade realizada em campo. O segundo desafio foi obter o máximo de combinações práticas de misturas em tanque para soja e milho. Foi uma investigação sem caráter de recomendação de misturas e de produtos utilizados e sem garantia de eficiência agronômica, porém retrata a estabilidade física e química por meio de análises por imagens da ocorrência de deposição de produtos no fundo do tanque (decantação), floculação, formação de grumos, separação de fases e insolubilidade, entupimentos de filtros de sucção, da linha e das pontas de pulverização.

Misturas	1º Produto	2º Produto	3º Produto	4º Produto	5º Produto	6º Produto	pH	Formação de espuma	Incompatibilidade "Teste da garrafa PET"	Incompatibilidade Simulador de misturas	Entupimento de filtros de pontas (Malha 100)
1	2,4-D Nortox (SL)	Crucial (SL)	Assist				4,78	NÃO	NÃO	NÃO	ATENÇÃO
2	AuréuticoBR	Finale(SL)	Assist	Vorax			6,77	SIM	NÃO	NÃO	BAIXO RISCO
3	Orthene 750 BR (SP)	Afinco (SC)						SIM	SIM	SIM	RISCO
4	Orthene 750 BR (SP)	Match (EC)	CapataxBR (EC)				5,29	SIM	SIM	NÃO	ATENÇÃO
5	AuréuticoBR (SP)	Amistar TOP (SC)	Tuval (SC)	Marshal Star (EC)	Malathion (EC)	Assist	6,60	NÃO	NÃO	NÃO	ATENÇÃO

Figura 28. Exemplo de tabela de (in) compatibilidade de produtos fitossanitários. **Fonte:** NITEC/UENP, Bandeirantes-PR.

No primeiro estudo, foram realizadas mais de 100 misturas de produtos fitossanitários em um simulador de misturas em tanque com depósito, diferentes sistemas de agitação e de movimentação das caldas no circuito hidráulico, procedimento que deve representar a realidade e a maneira adequada de prepará-las em nível de campo. O simulador de misturas contém um depósito, bomba de sucção, sistemas de agitação, sistema de filtros de sucção, filtros de linhas, manômetro e barra de pulverização com três pontas de pulverização de gotas finas, médias e grossas. Portanto, as misturas apresentadas nesta Tabela foram preparadas na condição ótima de turbilhonamento constante da calda de pulverização por meio da agitação mecânica e hidráulica - retorno e Venturi (Figura 29).

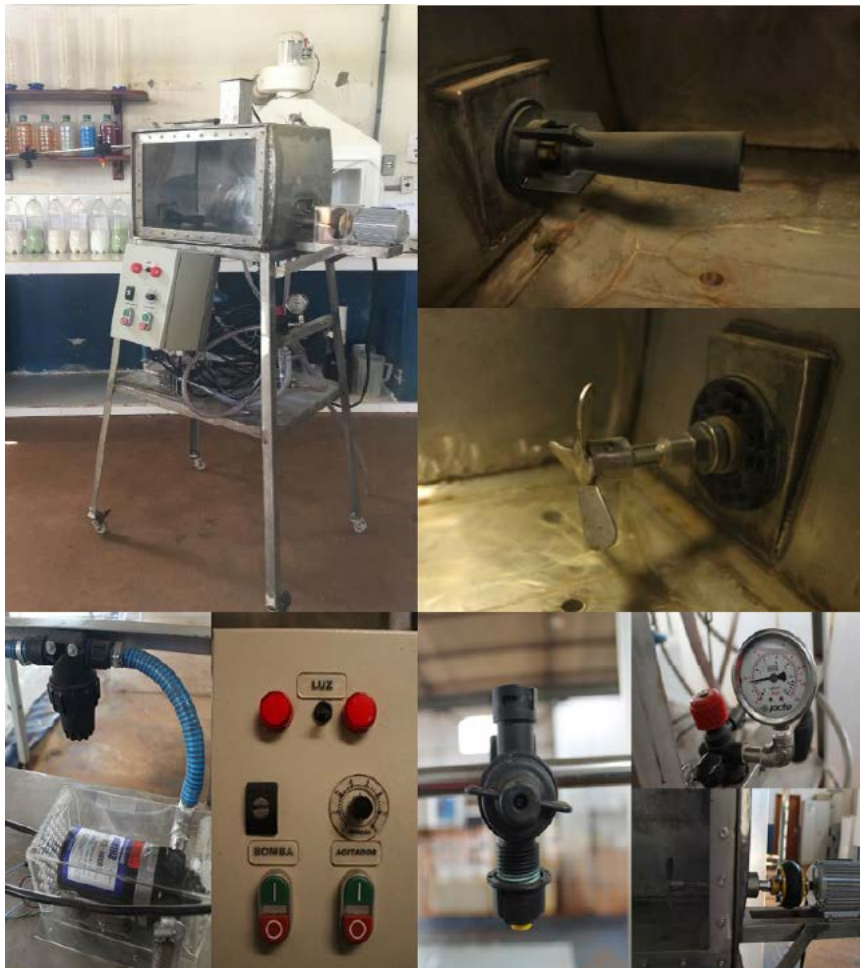


Figura 29. Demonstração do simulador de misturas com diferentes sistemas de agitação mecânica e hidráulica no 1º e no 2º experimentos.
Fonte: NITEC/UENP, Bandeirantes/PR.

No 2º experimento, visando a representar diferentes condições que realizam a prática das misturas em tanque, também foram preparadas misturas em balões volumétricos de 1 litro, em nível de laboratório e em garrafas PET de 2 litros,

práticas comuns nas fazendas. “Teste da garrafa PET” (Figuras 30 e 31).

Figura 30. Mosaico de misturas em tanque realizadas na cultura da soja e do milho.
Fonte: NITEC/UENP, Bandeirantes-PR

Figura 31. Mosaico de misturas em tanque realizadas para algodão, café, HF e batata.
Fonte: NITEC/UENP, Bandeirantes-PR.

Considerando ainda a pesquisa realizada por Gazziero (2015), sobre a mistura de produtos em tanque de pulverização, a maioria dos participantes (72%) afirmou desconhecer ou considerar insuficientes as informações sobre misturas, e 99% deles demonstraram interesse em recebê-las. Na busca da agricultura de precisão, as operações agrícolas têm utilizado técnicas que reduzem as perdas e proporcionam o máximo de eficiência e de lucro para o agricultor. Neste sentido, a realização

de pesquisas para construção de procedimentos "legais", e que forneçam informações técnicas para tomada de decisão da realização da prática de misturar produtos fitossanitários, contempla totalmente os anseios e os desejos da maioria dos agricultores que, a cada dia, têm buscado continuar praticando.

Por isso, tornam-se fundamentais pesquisas científicas para disponibilizar resultados de pesquisas para construção de listas de misturas de produtos fitossanitários em tanque, que são empregadas no controle de plantas daninhas, pragas, doenças e na nutrição foliar. Isto traz informações de misturas adequadas a serem realizadas e as possíveis misturas inadequadas que apresentam algum tipo de restrições de uso por incompatibilidades físicas (separação de fases, decantação, floculação), de pH, de entupimento de filtros e de pontas de pulverização.

5.5 Armazenamento de misturas de agrotóxicos em tanque

O tempo máximo de armazenamento das caldas no tanque de pulverização e/ou no tanque de pré-misturas ainda gera dúvidas na eficiência de controle de misturas de herbicidas. Portanto, são necessários estudos para a tomada de decisão de armazená-las por um determinado período ou utilizá-las mesmo em condições inadequadas (FERREIRA, 2019).

Condições inadequadas, como alta velocidade do vento, ocorrência de precipitação e problemas nos equipamentos podem impedir a realização da pulverização, sendo necessário armazenar as caldas até que as condições se tornem ideais (STEWART et al., 2009; EURE et al., 2011). Quanto maior o período em que o herbicida permanece na solução, maior a possibilidade de interações entre os ingredientes ativos e os elementos da água (NALEWAJA; MATYSIAK; SZELEZNIAK, 1994; LIN et al., 2003), pois interações entre os herbicidas, quando em mistura, podem gerar falhas no controle das plantas daninhas (LIN et al., 2002; DAMALAS; ELEFTHEROHORINOS, 2001). Além disso, o armazenamento pode favorecer a aderência do herbicida à superfície do tanque de pulverização (BOERBOOM, 2004).

Em trabalho realizado por Stewart et al. (2009), foi observado que o armazenamento das caldas em garrafas plásticas, no escuro, por 7 dias, não afetou a eficiência de controle de *Abutilon theophrasti*, *Amaranthus retroflexus*, *Ambrosia arte-*

misiifolia e *Chenopodium album*, tanto em pós quanto em pré-emergência, indicando que neste caso, é preferível adiar a aplicação ao invés de realizá-la em condições inapropriadas.

Em experimento similar, Eure et al. (2013) observaram que, por até 9 dias, os produtos diclosulam, dimethenamid, flumioxazin, fomesafen, imazethapyr, pendimethalin e S-metolachlor, armazenados em garrafas plásticas seladas em temperatura ambiente e no escuro, não apresentam redução de controle de *Brachiaria platyphylla*, *Chenopodium album*, *Ipomoea hederacea e Amaranthus palmeri*.

Outro fator que está associado à eficiência da mistura são as condições agrometeorológicas. Em pesquisa realizada por Silva, Oliveira e Gandolfo (2018), foi verificado que, em várias situações, essas condições não são atendidas, e que o tempo disponível para realizar as aplicações no Paraná varia de, no mínimo, 46 horas em junho até, no máximo, 285 horas no mês de agosto. Informações das condições de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade e direção dos ventos e precipitação são fundamentais antes, durante e após a pulverização; no entanto, a variabilidade meteorológica e falhas nos equipamentos podem gerar condições desfavoráveis e impedir sua realização logo após o preparo da calda. Com isso, ocorre a necessidade de armazenar os herbicidas no tanque de pulverização até que as condições se tornem ideais, podendo variar de horas a dias (STEWART et al., 2009; EURE et al., 2011; DEVKOTA; WHITFORD; JOHNSON, 2016).

Estudos de Ferreira (2019) objetivaram avaliar o efeito do tempo de armazenamento de duas misturas de herbicidas pós emergentes nas características físicas e químicas das caldas de pulverização e na eficiência de controle de plantas daninhas. Em três ambientes, foram realizados experimentos utilizando plantas daninhas e plantas de soja sensíveis aos herbicidas. O primeiro experimento foi realizado com as espécies *Amaranthus retroflexus*, *Commelina benghalensis e Sorghum halepense*; e o segundo, com *Glycine max* (L.), e ambos com a mistura de glyphosate + 2,4-D + óleo vegetal, todos submetidos a cinco períodos de armazenamento (no momento do preparo, 1, 2, 4 e 8 dias após o preparo).

Figura 32. Vista aérea da distribuição dos tratamentos e do controle proporcionado pela mistura dos herbicidas 2,4-D (1,5 L ha-1) e Glyphosate (3 L ha-1) nas espécies de *Sorghum halepens*e e *Amaranthus retroflexus*.
Fonte: NITEC/UENP, Bandeirantes-PR.

Para o experimento 1, aos 42 DAA, as notas médias de controle em todos os tratamentos, não apresentaram diferenças significativas, atingindo valores satisfatórios (> 80%) para as espécies *A. retroflexus e S. halepense*. No experimento 2,

aos 42 DAA, não houve efeito do armazenamento das caldas no controle de Chloris polydactyla, que permaneceu abaixo de 80% para todos os tratamentos. Aos 21 DAA, no experimento 3, todos os tratamentos apresentaram controle próximo a 100% para as plantas de soja. As variações no controle das espécies estão relacionadas com o tempo de avaliação após a aplicação das caldas. Não houve alteração das características físicas e químicas (tensão superficial, densidade e pH) para as duas misturas, independentemente do período de armazenamento. Com esses resultados, conclui-se que o armazenamento das caldas de glyphosate + 2,4-D e glyphosate + clethodim, por até 8 dias, pode ser uma estratégia quando as condições agrometeorológicas para aplicação não são adequadas.

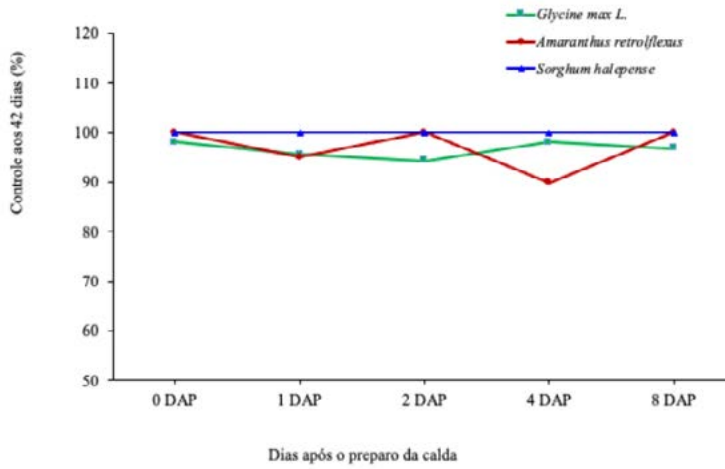


Figura 33. Controle das plantas aos 42 dias após a aplicação de glyphosate + 2,4-D + OV em função de dias após o preparo (DAP) da mistura.

5.6 Estratégias para aprimoramento das misturas em tanque

Os problemas com as misturas em tanque podem ser minimizados, observando-se as informações descritas abaixo:

a) Escolher adequadamente os tipos de produtos necessários;

b) Conhecer a ordem da mistura dos produtos em tanque é crucial no preparo das caldas de pulverização;

c) Metodologias de simulação de compatibilidade de produtos fitossanitários em depósito com agitação e circulação representam melhor a realidade do preparo das misturas;

d) A avaliação preventiva da mistura, por meio do popular "teste da garrafa PET", também chamado de teste da jarra, que consiste em misturar os produtos na mesma ordem e na proporção utilizada em campo, traz o benefício de reduzir os problemas de estabilidade física perceptível ao olho nu. Porém, esse teste não permite saber a variabilidade e a desestabilidade durante a pulverização, e não garante possíveis ausências de entupimento de filtros das pontas de pulverização. Cautelas também devem se tomadas em formulações "leitosas" que camuflam a mistura e não permitem a visualização de incompatibilidade;

e) Não é verdadeira a afirmação de que somente os fertilizantes foliares comprometem a estabilidade das caldas de pulverização;

f) É importante verificar os componentes com relação intrínseca à hidráulica do pulverizador, aos tipos de bomba, ao sistema de agitação e à filtragem;

g) O dimensionamento correto do sistema de agitação e a combinação de agitação hidráulica e mecânica contribuem para homogeneizar a calda de pulverização ou para reduzir o risco de desestabilidade da calda;

h) É recomendado que os tanques de pré-misturas tenham algum tipo de sistema de agitação de caldas. Neste processo, é necessário também muita atenção na quantidade de água. Preparar em baixa quantidade de água pode comprometer a solubilidade dos produtos;

i) Os itens f, g e h devem virar rotina nos programas de extensões privada e pública em tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No preparo de caldas, cada propriedade tem suas particularidades, problemas e soluções específicas que deverão ser analisados e orientados para evitar e para corrigir os erros.

Atualmente, existe a tendência de reduzir a taxa de aplicação (volume/área) e de aumentar a quantidade de produtos na mistura em tanque. Estas duas ações têm como consequência o aumento da concentração dos produtos fitossanitários e a redução da quantidade de água utilizada no preparo das caldas, o que representa um grande desafio para a ciência da tecnologia de aplicação.

Para que as misturas de produtos fitossanitários em tanque sejam bem-sucedidas, é necessário maior proximidade entre a engenharia da tecnologia de aplicação, a engenharia química e a orientação para os profissionais envolvidos nas aplicações.

Novas pesquisas são necessárias para que se possa gerar mais informações e conhecimentos e levantar evidências técnicas do que é possível, ou não, de ser realizado. Faz-se necessário ampliar as discussões sobre o tema e aproximar toda a cadeia produtiva interessada, de foram que as misturam possam ser feitas com base na ciência e na tecnologia.

AGRADECIMENTOS

À equipe do Núcleo de Investigação em Tecnologia de Aplicação e Máquinas Agrícolas-NITEC, da Universidade Estadual do Norte do Paraná-UENP, Bandeirantes-PR. Em especial aos Doutorandos Laís Maria Bonadio Precipito, Luiz Augusto Inojosa Ferreira e Gustavo Dario. À equipe da EMBRAPA, pela parceria, excelência em pesquisa e experiências compartilhadas.

REFERÊNCIAS

BOERBOOM, C. **Field case studies of dicamba movement to soybeans**, 2004. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/ad82/0d0da22d7e4d5a94d16b6ce87ed2967b19ec.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2019.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Portaria nº 67, de 30 de maio de 1995**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 30 mai. 1995.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa n. 46, de 24 de julho de 2002**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 24 jul. 2002.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento/Secretaria de Defesa Agropecuária. I**nstrução Normativa n. 40, de 11 de outubro de 2018**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 11 out. 2018. Seção 1, p. 3.

CAMPLI, C. M. **Espalhamento e tempo de evaporação de gotas pulverizadas em folhas de tomateiro sob condições controladas de temperatura e umidade relativa do ar. 2015**. 98 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade Estadual do Norte do Paraná, Bandeirantes, 2015.

CONCENTRADO EMULSIONÁVEL (EC). **Croda crop care**, 2019. Disponível em: <https://www.crodacropcare.com/pt-br/products-and-applications/emulsifiable-concentrate>. Acesso em: 1 mai. 2019.

DAMALAS, C. A.; ELEFTHEROHORINOS, I. G. Dicamba and Atrazine *Antagonism on Sulfonylurea* Herbicides Used for Johnsongrass (*Sorghum halepense*) Control in Corn (Zea mays). **Weed Technology**, v. 15, n. 1, p. 62-67, 2001.

DEVKOTA, P.; WHITFORD, F.; JOHNSON, W. G. Influence of Spray-Solution Temperature and Holding Duration on Weed Control with Premixed Glyphosate and Dicamba Formulation. **Weed Technology**, v. 30, n. 1, p. 116-122, 2016.

EURE, P. M. et al. Performance of Cotton Agrochemicals when Spray Solution Application is Delayed. **The Journal of Cotton Science**, v. 15, n. 3, p. 215-223, 2011.

EURE, P. M. et al. Efficacy of herbicides when spray solution application is delayed. **International Journal of Agronomy**, 7 p, Article ID 782486, 2013.

FOLONI, L. L.; CARBONARI, C. A. Tecnologia de aplicação de herbicidas: metodologia, e resenha histórica das tecnologias utilizadas com o glyphosate. In:. Ed: VELINI, E. D. Et al. **Glyphosate**. Botucatu: FEPAF, 2009. p. 259-298.

GAZZIERO, D. L. P. Misturas de agrotóxicos em tanque nas propriedades agrícolas do Brasil. **Planta Daninha**, v. 33, n. 1, p. 83-92, 2015.

GOMES, S. A. et al. Residual effect of mixture of glyphosate and 2,4-D in winter maizein different soil textures. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** v. 21, n. 5, p. 317-321, 2017.

GOUGE, T. **Understanding Pesticide Formulations**, 2010 [Apresentação de slides] Disponível em: < http://visordocs.sic.gov.co/documentos/Docs029/docs24/2015/2015008406OF/2015008406OF0000000003.PDF?239 >. Acesso: em 1 mai. 2019.

GUPTA, P. K. Pesticide exposure - Indian scene. **Toxicology**, v. 198, n. 1-3, p. 83-90, 2004.

GREEN, J. M.; BEESTMAN, G. B. Recently patented and commercialized formulation and adjuvant technology. **Crop Protection**, v. 26, n. 3, p. 320-327, 2007.

GREEN, J. M. The rise and future of glyphosate and glyphosate-resistant crops. **Pesticide Management Science**, v. 74, n. 5, p. 1.035-1.039, 2016.

HAZRA, D. K. et al. Recent advances in pesticide formulations for eco-friendly and sustainable vegetable pest management: A review. **Archives of Agriculture and Environmental Science**, v. 2, n. 3, p. 232-237, 2017.

LIN, C. et al. Determination of isoxaflutole (balance) and its metabolites in water using solid phase extractions followed by high-performance liquid chromatography with ultraviolet or mass spectrometry. **Journal of Agricultural and Food Chemistry,** v. 50, n. 21, p. 5.816-824, 2002.

LIN, C. et al. Degradation of Isoxaflutole (Balance) Herbicide by Hypochlorite in Tap Water. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, n. 27, p. 8.011-8.014, 2003.

LIMA, L. C. F. **Produtos fitossanitários**: misturas em tanque. Cascavel: Ocepar/Coodetec/Associação Nacional de Defesa Vegetal (Relatório Técnico), 1997.

LING, K. Discovery of Agrochemicals, 2013[Apresentação de slides] Disponível em: < oxfordsynthesiscdt.ox.ac.uk/resources/SBM-CDT-Agrochemistry.pdf >. Acesso em: 1 mai. 2019.

NALEWAJA, J. D.; MATYSIAK, R.; SZELEZNIAK, E. Sethoxydim Response to Spray Carrier Chemical Properties and Environment. **Weed Technology**, v. 8, p. 591-597, 1994.

OLIVEIRA, R. B. et al. Misturas em tanque. **Revista Agro DBO**, n. 95, p. 23, 2017.

PETTER, F. A. et al. Incompatibilidade física de misturas entre inseticidas e fungicidas. **Comunicata Scientiae**, v. 4, n. 2, p. 129-138, 2013.

QUEIROZ, A. A.; MARTINS, J. A. S.; CUNHA, J. P. A. R. Adjuvantes e qualidade da água na aplicação de agrotóxicos. **Bioscience Journal**, v. 24, n. 4, p. 8-19, 2008.

QUEIROZ, M. F. P. E**spectro de gotas e características físicas de caldas com adjuvantes tensoativos e os herbicidas glyphosate e 2,4-d, isolados e em mistura**. 2018. 74 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Energia na Agricultura)- Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", São Paulo, 2018.

RAETANO, C. G. **Apresentação, Formulação dos produtos fitossanitários**. Disponível em:<https://www.fca.unesp.br/Home/Instituicao/Departamentos/DefesaFitossanitaria/formulacao-dos-produtos-fitossanitarios-aula-2.pdf.>.

SILVA, A. F.; OLIVEIRA, R. B.; GANDOLFO, M. A. Mapping of the time available for application of pesticides in the state of Paraná, Brazil. **Acta Scientiarum**, v. 40, e. 39421, 2018.

STEWART, C. L. et al. How long can a herbicide remain in the spray tank without losing efficacy? **Crop Protection,** v. 28, n. 12, p. 1.086-1.090, 2009.

TAKANO, H. K. et al. Efeito da adição do 2,4-D ao glyphosate para o controle de espécies de plantas daninhas de difícil controle. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 12, n. 1, p. 1-13, 2013.

WARE, G. W. Environmental contamination and toxicology. **Environmental Biotechnology**, 2014.

WOODS, N. et al. Agricultural chemical users' manual–Guidelines and principles for responsible agricultural chemical use. **Queensland: The State of Queensland, Department of Primary Industries and Fisheries**, v. 139, 2005.

CAPÍTULO 8

COMPORTAMENTO DE HERBICIDAS NO AMBIENTE

Patrícia Andrea Monquero[1]
Paulo Vinícius da Silva[2]

[1]Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, Araras-SP, Brasil. E-mail:pamonque@cca.ufscar.br, [2]Universidade Federal da Grande Dourados, UFGD, Dourados- MS, Brasil. E-mail:paulovsilva@ufgd.edu.br

1 INTRODUÇÃO

A utilização de agrotóxicos tem contribuído para a expansão e o desenvolvimento da agricultura brasileira. Entre as classes de agrotóxicos, destaca-se a comercialização de herbicidas (seletivos e não seletivos), fungicidas e inseticidas (Tabela 1). No Paraná, no ano de 2017, o uso de herbicidas correspondeu a 60,58% dos agrotóxicos utilizados (SIAGRO, 2019). As culturas que mais utilizam esses produtos são: soja (52,2%), cana-de-açúcar (11,7%), milho (10,6%) e algodão (6,7%) (SINDIVEG, 2018).

Tabela1. Comercialização de agrotóxicos no Brasil em 2016 e 2017.

Comercialização por Classe (U$$)		
Classe	**2016**	**2017**
Fungicidas	$3.099.973.557,00	$2.436.800.170,15
Inseticidas	$2.307.513.398,00	$2.379.852.801,14
Herbicidas Seletivos	$1.638.596.393,00	$1.776.055.493,66
Herbicidas Não Seletivos	$1.470.488.661,00	$1.335.825.344,18
TS	$562.33.999,00	$551.169.663,41
Outros	$380.793.526,00	$301.727.441,35
Acaricidas	$100.572.475,00	$111.523.789,67
Total Geral	$9.560.272.009,00	$8.892.954.703,56

Fonte: Sindiveg, 2018

O solo é o destino final de todos os produtos químicos usados na agricultura, tanto daqueles utilizados diretamente no solo como dos usados sobre as plantas, os quais ao entrarem em contato com o solo, estão sujeitos a processos físico-químicos que regulam seu destino no ambiente (MANCUSO et al., 2011).

Cada agrotóxico, em virtude dos átomos que o compõem, seu número e da maneira como eles são arranjados na estrutura química, possui uma série específica de propriedades físico-químicas que, juntamente com as características do ambiente (edáfica, climática e presença de microrganismos) podem determinar o destino da molécula. Dessa forma, os agrotóxicos podem sofrer processos de transporte, transformação e retenção, conforme apresentado na Figura 1.

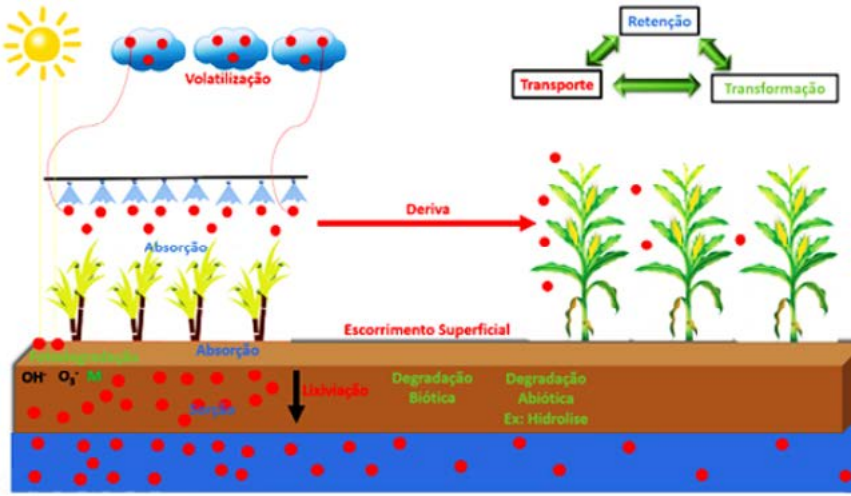


Figura 1. Dinâmica de Agrotóxicos no Ambiente.

2 PROPRIEDADES DOS HERBICIDAS

As principais propriedades físico-químicas dos herbicidas relacionadas ao seu comportamento no ambiente são: solubilidade em água (S), pressão de vapor (Pv), coeficiente de partição octanol-água (Kow), constante de equilíbrio de ionização ácido (pKa) ou base (pKb), constante da lei de Henry (H), reatividade ou meia-vida (t½), constante de sorção na fração mineral do solo (Kd) e constante de sorção normalizada para o teor de carbono orgânico (Koc) (OLIVEIRA; BRIGHENTI, 2011).

A solubilidade em água (S) pode ser definida como sendo a quantidade máxima de um herbicida que se dissolve em água pura a uma determinada temperatura e pressão. Seu valor é expresso em miligramas de herbicidas por litro de água e, normalmente, os ensaios são realizados em temperatura de 25°C e pressão de 1 atm (SILVA et al., 2007). O valor de solubilidade pode apresentar variação em função da polaridade das moléculas (e sua eletronegatividade), tamanho das moléculas, temperatura e pH (LAVORENTI, 1996).

Produtos com alta solubilidade em água são facilmente e/ou rapidamente distribuídos no ciclo hidrológico, normalmente também apresentam os menores coe-

ficientes de adsorção (com algumas exceções, como o glyphosate) e são rapidamente biodegradáveis (SILVA et al., 2014). Os herbicidas podem ser classificados em relação a sua solubilidade em alta, moderada e baixa, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Classificação de herbicidas em relação à solubilidade em água.

Solubilidade em água (mg/L)	**Intensidade**	**Exemplo de Herbicidas**
Igual ou < 50	Baixa	Atrazina, Pendimethalin
> 50 e < e/ou igual 500	Moderada	Fomasafem, Ametrina
> 500	Alta	Acifluorfen, Glyphosate

Fonte: Adaptado de Carvalho (2013).

A pressão de vapor (Pv) de uma molécula representa a tendência de volatilização do produto de seu estado sólido ou líquido. Herbicidas com maiores valores de Pv tendem a persistir no solo por um período menor de tempo, em detrimento da elevada volatilização, a qual pode elevar a chance de escape desses produtos para a atmosfera e, possivelmente, sua transferência para outro meio, como, por exemplo, áreas não alvo (LAVORENTI, 1996). De forma geral, herbicidas com valores de Pv > 10-2 mm Hg são considerados muito voláteis à temperatura ambiente (DEUBER, 1992). Nesse sentido, mediante os valores da pressão de vapor, é possível classificar um herbicida em detrimento de seu potencial de volatilização (Tabela 3).

Tabela 3. Classificação de herbicidas em relação à pressão de vapor (Pv).

Classificação	**Pressão de Vapor** mmHg	**Exemplo de Herbicidas**
Alta pressão de vapor	10-2 a 10-4	Maioria dos carbamotioatos (butilate), clomazone, trifluralin, ésteres de cadeia curta dos ácidos fenóxis (2,4-D éster)
Média pressão de vapor	10-5 a 10-6	Alaclor, butaclor, dicamba, linuron, napropamide, oxifluorfen pendimetalin, ésteres de cadeia longa dos ácidos fenóxis

Baixa pressão de vapor	<10-7	Acetoclor, atrazine e a maioria das triazinas, bentazon, diclofop, bipiridílios, fluazifop, glifosato, maioria das imidazolinonas, picloram, setoxidim, maioria das sulfonilureias.

Fonte: Adaptado de Carvalho (2013).

Outra característica é a constante da lei de Henry (Kh), que se trata de um coeficiente de partição ar-líquido ou vapor-líquido (PESSOA et al., 2004). Altos valores de Kh indicam que os solutos são altamente voláteis e, geralmente, seu valor diminui com o aumento da solubilidade do componente (LYMAN et al., 1982). De acordo com a lei de Henry, os herbicidas podem ser classificados em não voláteis, moderadamente voláteis e voláteis (Tabela 4).

Tabela 4.Classificação de herbicidas em relação à lei de Henry (KH).

Constante de Henry (Pa.m3/mol)	**Intensidade**	**Exemplo de Herbicidas**
< 2,5x10-7	Não volátil	glufosinate, glyphosate
=< 2,5x10-5 e >= 2,5x10-7	Moderadamente volátil	linuron, oxyfluorfen
> 2,5x10-5	Volátil	pendimethalin, trifluralin

Fonte: University of Hertfordshire (2019).

O coeficiente de partição octanol-água (Kow) determina a hidrofobicidade ou a tendência de partição do herbicida de um meio aquoso para um meio orgânico (DAY et al., 1998). Dessa forma, quando o herbicida é lipofílico (alto valor de Kow), ele apresenta maior afinidade a materiais de origem orgânica, resultando, por exemplo, em maior adsorção à matéria orgânica e/ou afinidade a ceras epicuticulares presentes na superfície foliar. Em contrapartida, menores valores de Kow são presentes em produtos hidrofílicos, os quais apresentam maior solubilidade em água. Dessa forma, os parâmetros Kow e solubilidade em água são inversamente proporcionais (REGITANO, 2002).

Valores de Kow não têm unidade e podem ser expressos na forma logarítmica (log Kow). Herbicidas altamente lipofílicos (com valor de logKow > 3) são fortemente, porém, reversivelmente, presos aos materiais lipídicos, como matéria orgânica do solo, folhas, raízes e outros tecidos gordurosos, inclusive de animais

(MONTGOMERY, 1997). De acordo com o valor de Kow, os herbicidas podem ser classificados pela sua lipolificilidade, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5. Classificação de herbicidas em relação ao coeficiente octanol-água (Kow).

Log Kow	Kow	Lipofilicidade	Exemplo de Herbicidas
< 0,1	< 1	Hidrofílico	Glifosato
0,1 a 1	1 a 10	Mediamente lipofílico	S-metolachlor
1 a 2	10 a 100	Lipofílico	Metribuzin
2 a 3	100 a 1000	Muito Lipofílico	Tebuthiuron
> 3	> 1000	Extremamente Lipofílico	Oxyfluorfen

Fonte: VIDAL, 2002 e RODRIGUES; ALMEIDA, 2018.

A constante de equilíbrio de ionização ácida (pKa) indica a maior ou a menor tendência de um herbicida em se ionizar. Os valores de pKa indicam se o herbicida é iônico e dentro de qual faixa do pH do solo isto acontece. O valor de pKa representa o valor de pH do solo, no qual 50% das moléculas se encontram na forma molecular e 50% na forma ionizada (SILVA et al., 2014)

Os herbicidas podem ser ácidos (dependendo do pH do solo e podem formar cargas negativas), básicos (dependendo do pH do solo e podem formar cargas positivas) ou não iônicos (OLIVEIRA; BRIGHENTI, 2011; SILVA et al., 2014). As formas ionizadas comportam-se diferentemente das formas não iônicas (PRATA, 2003). Logo, de acordo com o valor do pH do solo e o caráter (ácido ou básico) de um herbicida, esses produtos podem apresentar diferentes formas de dissociação (Tabela 6).

Tabela 6. Classificação de herbicidas em relação à dissociação em solos.

Interação pH x pKa	Herbicidas Ácidos Dissociação do Herbicida	Herbicidas Básicos Dissociação do Herbicida
pH da solução do solo = pKa	[M] = [MA]	[M] = [MC]
pH da solução do solo < pKa	[M] > [MA]	[M] < [MC]
pH da solução do solo > pKa	[M] < [MA]	[M] > [MC]

[M] = Formas não dissociadas (molecular); [MA]= Formas dissociadas (aniônicas); [MC]= Formas dissociadas (catiônicas).

Fonte: Adaptado de Oliveira e Brighenti (2011); Rodrigues e Almeida (2018).

A reatividade e/ou meia-vida (t½) representa o intervalo de tempo para que 50% da massa de moléculas do herbicida, inicialmente aplicada, seja degradada. Refere-se à capacidade da molécula em sofrer reações químicas e transformar-se em outros produtos (CARVALHO et al., 2013). Segundo Silva et al. (2014), o cálculo da meia-vida (t½) pode ser obtido através do modelo de primeira ordem definido pela equação:

$$\mathbf{Ln\ C_0/C_1 = K^*\ t}$$

Em que: C_0 é a concentração inicial do herbicida; C_f é a concentração no tempo (t) e K a constante de degradação. A meia-vida (t½) é utilizada como parâmetro para determinar o período de persistência de um herbicida no ambiente, ou seja, período de tempo durante o qual a substância permanece no meio ambiente. Os herbicidas podem ser classificados em relação a sua persistência (Tabela 7).

Tabela 7. Classificação de herbicidas em Relação à persistência, em função da meia-vida

Tempo de Meia-Vida (Dias)	Classificação	Exemplo de Herbicidas
< 30	Não Persistente	Metribuzim, Glyphosate
30 – 100	Mediamente Persistente	Atrazina, Ametrina
100 – 365	Persistente	Trifuralina, Pendimethalin
> 365	Muito Persistente	Tebuthiuron, Paraquat

Fonte: Adaptado de CARVALHO (2013).

Além das características físico-químicas dos herbicidas, outros fatores influenciam na eficácia e no destino final desses produtos, como: precipitação, atividade de microrganismos, temperatura, umidade do solo, porosidade, matéria orgânica, conteúdo de argila, estrutura e textura do solo (WEBER, 1990).

3 RETENÇÃO DE HERBICIDAS

O processo de retenção é a habilidade do solo em reter um herbicida, diminuindo sua biodisponibilidade na solução; dessa forma, esses produtos não apresentam mobilidade, nem na matriz do solo quanto para fora dela (OLIVEIRA;

BRIGHENTI, 2011). A adsorção é recorrentemente denominada pelo termo sorção, o qual representa um termo geral que abrange a adsorção, absorção, precipitação e partição hidrofóbica, sem distinção entre esses processos (OLIVEIRA; BRIGHENTI, 2011; SCORZA JR.; REGITANO, 2012).

Dessa forma, a adsorção dos herbicidas aplicados nos solos representa a retenção na matriz coloidal, e essa intensidade de retenção ocorre em detrimento das características físico-químicas dos produtos, reduzindo, assim, a disponibilidade desses produtos em solução do solo (SILVA et al., 2014). Logo, a adsorção de herbicidas reduz a quantidade de herbicida em solução do solo disponível para ser absorvido pelas plantas, ser transportado e/ou degradado.

A dessorção trata-se do contrário da adsorção, ou seja, é o processo em que o herbicida incialmente adsorvido à matriz coloidal retorna para a solução do solo, tornando-se novamente disponível em solução do solo (SILVA et al., 2014). De maneira geral, a quantidade de herbicida adsorvido pelo solo é maior que a quantidade dessorvida (ADREU; PICÓ, 2004; SCORZA JR.; REGITANO, 2012). Esse balanço entre adsorção e dessorção é fundamental para determinar a disponibilidade dos herbicidas na solução do solo, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3: Dinâmica de Sorção e Dessorção de Herbicidas em Solos.

A sorção e a dessorção de herbicidas podem ser mensuradas através dos coeficientes de partição no solo, dentre os quais se destacam três parâmetros: Kd (coeficiente de sorção), Koc (coeficiente de sorção normatizado para o teor de carbono orgânico presente no solo) e Kf (coeficiente de sorção através do isoterma da equação de Freundlich) (OLIVEIRA; BRIGHENTI, 2011; SILVA et al., 2014).

O coeficiente de sorção (Kd) leva em consideração a concentração de herbicida sorvida no solo e a concentração de herbicida que permanece em solução, após o estabelecimento de um equilíbrio (WEBER et al., 2004). O coeficiente de adsorção (Kd), normalmente, é expresso em quantidade de herbicida por quantidade de solo, sendo normalmente expresso em mg/Kg ou ml/g.

$$Kd = \frac{\text{Concentração de herbicida no solo}}{\text{Concentração de herbicida na água}}$$

O Koc (coeficiente de sorção normatizado para o teor de carbono orgânico do solo) leva em consideração o Kd e o teor de carbono orgânico presente no solo (WEBER et al., 2000). O Koc, normalmente, é expresso em quantidade de herbicida por quantidade de solo, sendo normalmente expresso em mg/Kg ou ml/g.

$$Koc = \frac{Kd \times 100}{\%\text{ de carbono orgânico}}$$

Além dessas informações, frequentemente, tem-se adotado para os estudos de sorção a equação de Freundlich (Kf), que estabelece uma isoterma de sorção, avaliando o comportamento exponencial da quantidade de herbicida adsorvido no solo e disponível em solução. Esse modelo empírico leva em consideração os valores de Kd em diferentes concentrações iniciais do herbicida em solução do solo (FREUNDLICH; HATFIELD, 1926).

$$X/M = K.f.Ce^{1/n}$$

Em que: Kf é a constante de Freundlich e 1/n uma constante (índice da intensidade da adsorção) que depende da substância adsorvida e do meio adsorvente. O parâmetro X representa o volume da solução de herbicida adicionado (mL) e M é

a massa do solo (g), Ce é a concentração do herbicida no equilíbrio com o solo (mg/mL) (FREUNDLICH; HATFIELD, 1926).

A adsorção e a dessorção de herbicidas dependem da variação das propriedades físico-químicas dos solos e das características físico-químicas dos herbicidas. Dentre as principias características físico-químicas dos herbicidas que influenciam essa dinâmica, podemos citar: pKa, Kow, Pressão de Vapor (Pv), Solubilidade (S), Fotodegradação, Degradação, Persistência, Mobilidade e valores dos coeficientes de Kd e Koc. Em relação aos atributos do solo que influenciam na sorção e dessorção de herbicidas, podemos mencionar: pH, Silte (%), Matéria orgânica (%), Argila (%), Areia (%) e CTC (Capacidade de Troca Catiônica) (OLIVEIRA; BRIGHENTI, 2011). Mediante essas informações, é possível estabelecer uma predição do comportamento de herbicidas no solo, as quais podem servir como auxílio no ajuste de doses a serem adotadas em aplicações, em culturas agrícolas, e/ou minimizar possíveis impactos ambientais que ocasionalmente possam ocorrer mediante o posicionamento desses produtos. No entanto, deve relacionar-se as características físico-químicas presentes no solo com a adsorção dos herbicidas (Koc, Kd e Kf), visando a quantificar a proporção de herbicida que ficara retida no solo e a quantidade de herbicida que ficara disponível na solução, objetivando maior eficácia no controle de plantas daninhas (BONFLEUR et al., 2016).

A correlação entre as características físico-químicas dos solos e os coeficientes de adsorção de herbicidas residuais também podem fornecer informações relativas ao seu residual e até servir como base para justificar a eficácia ou a ineficiência desses produtos no controle de plantas daninhas (CHRISTOFFOLETI et al., 2009).

Nesse sentido, a correlação dos coeficientes de adsorção com a porcentagem de matéria orgânica do solo indica que solos com maiores porcentagens de matéria orgânica podem resultar em maiores coeficientes de adsorção, dependendo das características físico-químicas do herbicida. Essa dinâmica influencia diretamente na eficácia de controle de plantas daninhas.

Alonso et al. (2011), realizando experimento de sorção e de dessorção do herbicida indaziflam em solos com diferentes características físico-químicas, verificaram a influência da matéria orgânica no processo de sorção; sendo que, em solos com maiores porcentagens de matéria orgânica, os autores verificaram maiores valores de Kd e, consequentemente, menor biodisponibilidade do herbicida em

solução do solo para o controle de plantas daninhas. Os autores também verificaram baixa dessorção do herbicida em solos com maiores porcentagens de matéria orgânica. Mediante essas características, os autores classificam o indaziflam como um produto de baixa mobilidade no ambiente em virtude de seus coeficientes de adsorção e dessorção

Resultados semelhantes foram obtidos por Da Silva et al. (2018), em que, trabalhando com a adsorção e a dessorção de indaziflam em solos com diferentes características físico-químicas, verificaram maiores coeficientes de adsorção (Kd) e menores coeficientes de dessorção (Kd de dessorção), em solos com maiores porcentagens de matéria orgânica.

Sebastian et al. (2016) verificaram a influência da alta dessorção do indaziflam em matéria orgânica no controle de plantas daninhas, pois estudando a influência das propriedades do solo na eficácia do herbicida indaziflam, no controle de *Kochia scoparia* L., constataram que é necessária uma concentração de herbicida de 10 a 100 vezes maior para produzir a redução de crescimento de 50% (GR50) para um solo com 16,8% de MO em comparação com um solo com 0,4%.

O pH também afeta a adsorção de herbicidas; dessa forma, o valor do pH do solo, associado com o caráter ácido ou básico do herbicida, influencia diretamente em sua dissociação e, consequentemente, em sua biodisponibilidade em solução do solo, afetando diretamente seus valores de coeficiente de adsorção. Essa influência do pH ocorre em virtude da natureza iônica ou não iônica dos herbicidas (SILVA et al., 2007). Esse estado de ionização dos produtos está diretamente relacionado a sua sorção aos coloides orgânicos e minerais do solo, afetando a degradação, a persistência e, principalmente, a atividade desses herbicidas no solo (FERRI et al., 2000).

Kraemer et al. (2009) relataram que os herbicidas pertencentes ao grupo das imidazolinonas apresentam a maior parte de suas moléculas na forma dissociada, em solos e/ou soluções em ácidas, e quanto mais próximo o pH de zero maior á a proporção do imazapic na forma dissociada e, consequentemente, maior a parcela do herbicida disponível em solução do solo para fenômenos de degradação e de sorção. Em contraposição, solos mais básicos reduzem a proporção de imazapic na forma dissociada, e nessas situações temos menor proporção de imazapic disponível em solução do solo para fenômenos de sorção. Essa dinâmica de dissociação de alguns herbicidas pertencentes aos grupos das imidazolinonas pode ser observada na Figura 4.

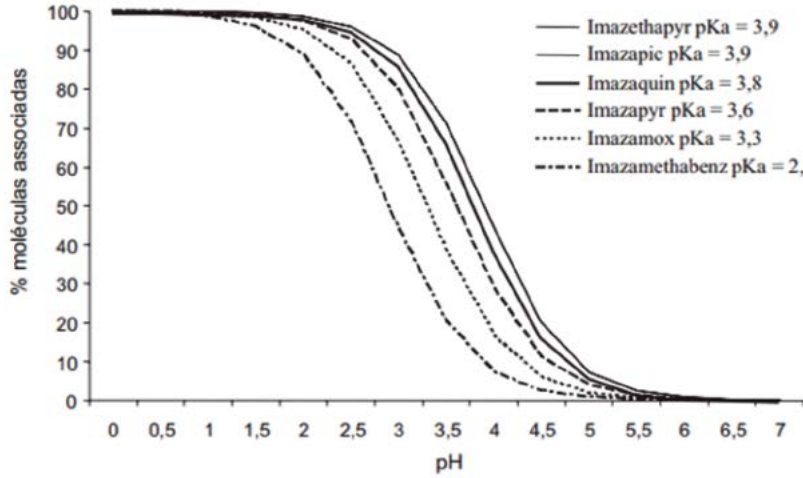


Figura 4. Curva teórica de titulação das imidazolinonas, calculada pelo autor, utilizando a equação de Henderson-Hasselbalch.
Fonte: KRAEMER et. al. (2009)

Logo, em sistema de produção agrícola, associar as informações pertinentes às características físico-químicas de herbicidas com seus coeficientes de adsorção (Kd, Koc e Kf), com atributos do solo (como, por exemplo, matéria orgânica, teor de argila e pH do solo), pode proporcionar uma correta predileção da dinâmica de herbicidas pré-emergentes no ambiente.

4 PERSISTÊNCIA DE HERBICIDAS

É importante ressaltar a diferença entre persistência e período residual de um determinado produto. A persistência é o período de tempo em que um herbicida permanece no ambiente sem, necessariamente apresentar atividade no solo. Já o efeito residual de um herbicida é o período de tempo em que um herbicida permanece com atividade no solo após a sua aplicação (MANCUSO et al., 2011).

O tempo em que um herbicida permanece ativo no solo é de fundamental importância para a determinação do período de controle das plantas daninhas, bem como para a identificação do risco do possível potencial desse resíduo no solo para

as culturas sucessoras. Vários fatores estão relacionados à degradação dos herbicidas no solo, os quais influenciam diretamente na persistência do produto no ambiente. A persistência é normalmente relacionada à meia-vida do produto (t½), que é definida como o tempo em que há a redução de 50% do herbicida aplicado (SILVA et al., 2014).

Existem ainda os termos: t ½ de metabolização, a transformação do herbicida em metabólitos que podem ser mais ou menos tóxicos do que a molécula original e t ½ de mineralização, considerando a total quebra da molécula de herbicida, formando gás carbônico e água.

A meia-vida é fundamental para a redução da persistência de um herbicida no ambiente, pois pode promover a degradação e a dissipação do herbicida. Esse processo pode ser parcial, formando metabólitos, ou completa (mineralização), dando origem a CO2, H_2O e a sais minerais (OLIVEIRA JR.; REGINATO, 2009).

5 TRANSPORTE DE HERBICIDAS

5.1 Lixiviação

O processo de lixiviação é a principal forma de transporte de herbicidas no solo, das moléculas não voláteis e solúveis em água, e representa a movimentação ascendente ou descendente do herbicida no solo. Essas moléculas deslocam-se no perfil do solo, acompanhando o fluxo de água, o qual é governado pela diferença de potencial da água entre dois pontos (PRATA et al., 2003). A lixiviação é fundamental para a incorporação superficial da maioria dos herbicidas, atingindo plântulas em germinação; mas, quando excessiva, pode carreá-los para camadas mais profundas do solo, limitando sua ação e podendo, inclusive, promover a contaminação do lençol freático e de águas superficiais (VELINI, 1992).

Para herbicidas de elevada capacidade adsortiva, o conteúdo de matéria orgânica do solo é geralmente um fator importante; pois, quanto maior a porcentagem de matéria orgânica no solo, maior será a adsorção do herbicida e, com isso, menor a lixiviação. Em solos arenosos, a lixiviação será ainda maior do que em solos

siltosos ou argilosos (ROSSI et al., 2005). Para ser lixiviado, o herbicida deve estar na solução do solo ou adsorvido a pequenas partículas, como argilas, ácidos fúlvicos e húmicos de baixo peso molecular, aminoácidos, peptídeos e açúcares, entre outros (OLIVEIRA, 2001).

Adicionada às características relacionadas ao transporte, a persistência da molécula do herbicida no ambiente também é um fator diretamente relacionado à sua lixiviação, pois quanto maior a persistência de um herbicida no ambiente, maior a probabilidade desse produto em ser transportado para águas subterrâneas por meio da lixiviação. Principalmente se há movimentação no sentido vertical do solo, uma vez que a degradação microbiana, considerada a principal forma de quebra das moléculas de herbicida no ambiente edáfico, é diminuída à medida que o herbicida se distancia da superfície (SANTOS et al., 2013). Além disso, o comportamento das moléculas no solo é influenciado por diversos outros fatores, tais como pH, capacidade de troca catiônica, textura, mineralogia e teor de matéria orgânica, que determinam os processos de adsorção ou de dessorção do herbicida no solo (VENCILL et al., 2002).

Em solos com baixo teor de matéria orgânica e CTC efetiva, verificou-se, por exemplo, aumento na ocorrência de efeitos fitotóxicos do S-metolachlor às culturas e a probabilidade de contaminação de águas subterrâneas (PROCÓPIO et al., 2001).

O índice GUS (índice de vulnerabilidade de águas subterrâneas), proposto por Gustafson (1989), trata-se de um índice empírico e classifica os compostos de acordo com sua tendência de lixiviação: GUS = log $t_{1/2}$ (4 - log $_{Koc}$); em que GUS representa um índice adimensional, $t_{1/2}$ representa a meia-vida do herbicida no solo (dias) e K_{oc} representa o coeficiente de sorção normalizado para o teor de carbono orgânico (L kg^{-1}). Herbicidas com GUS < 1,8 são considerados não lixiviadores, ao passo que índices superiores a 2,8 representam produtos lixiviadores. Aqueles com valores entre 1,8 e 2,8 são considerados intermediários (Tabela 8) (CARVALHO, 2013).

Segundo Oliveira e Regitano (2009), as duas propriedades mais importantes no que se refere ao processo de lixiviação são a sorção (Kd, Koc, Kf) e a meia-vida (t ½) do produto. A sorção dita a disponibilidade de um pesticida na solução do solo, e a meia-vida reflete a persistência no solo, e, portanto, ambos regulam o potencial

de lixiviação.

O critério adotado pelo California Department of Food and Agriculture (CDFA), proposto por Widerson e Kim (1986), estabelece que herbicidas que apresentem K_{oc} menor que 512 L kg^{-1} e meia-vida superior a 11 dias são classificados como produtos lixiviadores.

Por sua vez, Cohen et al. (1984) estabeleceram que herbicidas com K_{oc} menores que 300 L kg^{-1} e valores de meia-vida superiores a 21 dias são considerados lixiviadores, ao passo que aqueles com Koc superiores a 500 L kg^{-1} e $t_{1/2}$ inferiores a 14 dias representam produtos não lixiviadores.

Os critérios da EPA envolvem os valores de solubilidade em água a 25ºC>30mg L^{-1}; Koc<300-500cm3 g^{-1}; constante da Lei de Henry (KH)<10-2 Pa m^3 mol-1, especiação (presença de forma aniônica em pH normal, entre 5,0 e 8,0) e $t^{½}$ em solo >21 dias e na água >175 dias; condições de campo que favorecem a percolação no solo, como índice de pluviosidade anual >250mm; aquífero não confinado e solo poroso. Agrotóxicos que se enquadram nessas características são considerados potencialmente poluidores de águas subterrâneas.

Para a quantificação de herbicidas lixiviados no perfil do solo, destacam-se duas metodologias: a primeira relativa à cromatografia líquida de alta eficiência, e a segunda através da utilização de herbicidas radiomarcados (NEGRISOLI et al., 2007; CAVENAGHI et al., 2007; TOFOLI et al., 2009; TOLEDO et al., 2009; TOLEDO et al., 2012; ROSSI et al., 2013). Em relação a metodologias qualitativas, podemos citar a técnica dos bioensaios, que permite estudar o movimento do herbicida pelo perfil do solo, através da utilização de plantas sensíveis aos produtos testados, de forma que resíduos presentes no solo possam ser evidenciados por meio da apresentação de sintomas de injúrias na planta-teste (bioindicadora) (PASQUALETTO et al., 1999). Matallo et al. (2003), em estudos de lixiviação dos herbicidas diuron e tebuthiuron, concluíram que os dois herbicidas lixiviaram através da camada de 50 cm, e o teor de matéria orgânica dos solos influenciou a capacidade de lixiviação desses herbicidas. Silva et al. (2014), estudando a lixiviação do fomesafen, verificaram que os fatores que mais afetaram a lixiviação, em ordem decrescente de importância, foram o teor de matéria orgânica, a textura e o pH do solo.

Pereira et al. (2017) estudaram a lixiviação do clomazone em amostras de solos, coletados em diferentes regiões do Brasil. O sorgo foi utilizado para detecção

do herbicida. O clomazone não causou intoxicação ao sorgo cultivado no Organossolo, indicando forte sorção do herbicida nesse solo. O aumento do pH do Latossolo Vermelho-Amarelo reduziu a lixiviação. Maior precipitação causou aumento da lixiviação do herbicida no Latossolo Vermelho-Amarelo (pH 5,1) e no Neossolo Quartzarênico. A maior lixiviação ocorreu em solos com menor pH e menor teor de matéria orgânica. Outros estudos usando clomazone, em diferentes solos, também relataram a sorção do herbicida com a matéria orgânica do solo, reduzindo a mobilidade (GUNASEKARA et al., 2009).

Refatti et al. (2017) determinaram o potencial de lixiviação dos herbicidas utilizados no sistema Clearfield® de arroz irrigado, através da metodologia de bioensaio, e concluíram que as misturas de imazethapyr + imazapic, imazapyr + imazapic e imazethapyr lixiviam no solo, atingindo profundidades de até 25 cm em solo de várzea.

Florido et al. (2015), estudando a mobilidade e a lixiviação do imazaquin em Latossolo Vermelho Eutrófico (textura muito argilosa), Nitossolo Háplico Eutrófico (textura média argilosa), Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico (textura média argilosa) e Neossolo Quartzarênico Órtico (textura arenosa), para a obtenção do coeficiente de mobilidade (Rf) de uma solução de 14C-imazaquin, obtiveram valores de Rf que variaram entre 0,803 e 1, indicando que o herbicida possui alta mobilidade para todos os solos.

Florido et al. (2015), em estudo de lixiviação de imazaquim, através da metodologia de produtos radiomarcados em solos classificados como Latossolos Vermelhos, que eles diferiam quimicamente quanto à matéria orgânica e pH. Verificaram que a maior parte de radioatividade do imazaquin foi retida nas camadas de 0 a 10 cm nos dois solos LVe; sendo que, no solo com maior pH, uma pequena % de radioatividade foi notada até à camada de 15-20 cm. Dessa forma, os autores concluíram que o herbicida imazaquin tem maior mobilidade em solos com baixo teor de matéria orgânica e de argila e em solos com alto pH.

Inoue et al. (2003) avaliaram o risco potencial de lixiviação dos herbicidas no Estado do Paraná, utilizando três critérios teóricos (GUS, CDFA e Cohen), tendo sido usadas as propriedades físico-químicas dos herbicidas para o cálculo dos índices propostos, compiladas da literatura. Verificaram que a classificação quanto ao potencial de lixiviação demonstrou que acifluorfen-sódio, alachlor, atrazine, chlo-

rimuron-ethyl, fomesafen, hexazinone, imazamox, imazapyr, imazaquin, imazethapyr, metolachlor, metribuzin, metsulfuron-methyl, nicosulfuron, picloram, sulfentrazone e tebuthiuron são potencialmente lixiviadores, de acordo com os três critérios teóricos adotados.

Gomes et al. (2001) constataram que o herbicida tebuthiuron, utilizado em cana-de-açúcar para manejar plantas daninhas em pré-emergência e com alto poder residual, foi detectado em todas as amostras de água coletadas, no período de 1995 a 1999, em 53 metros de profundidade.

5.2 Escoamento superficial

O escoamento superficial é definido como o movimento de herbicidas na superfície do solo para áreas não tratadas, juntamente com partículas do solo ou solúveis na solução do solo, após precipitação (OLIVEIRA; BRIGHENTI, 2011).

Nos locais que recentemente tiveram sua floresta cortada ou que estão sendo preparados para o plantio convencional, frequentemente, ocorre maior escoamento superficial, devido à ausência de cobertura do solo, que é capaz de reter parte da água da chuva e de amortecer o impacto mecânico das gotas de água no solo, o que pode proporcionar menor quantidade de água infiltrada, e com isto, maior quantidade de água escoada, formando o processo de enxurrada e/ou escorrimento superficial (PINHO, 2003).

Outro fator que também interfere no escoamento de herbicidas no solo, são as propriedades físicas do solo, como, por exemplo, a quantidade de macro e microporos, que resultam em maior e/ou menor espaço poroso para lixiviação e movimentação da água no perfil do solo. A compactação do solo, pois um solo com maior compactação resulta em menor infiltração e lixiviação da água no perfil do solo, favorece o escoamento superficial (OLIVEIRA JR.; REGINATO, 2009).

Segundo Mersie et al. (1999), a perda de herbicidas no escoamento superficial pode variar de 1 a 10% da concentração que foi inicialmente aplicada. O escoamento superficial depende de propriedades físico-químicas dos herbicidas (como, por exemplo, a meia-vida - t1/2), mas também de características do ambiente como solo, compactação, textura, quantidade de chuva, tempo entre a aplicação e a pri-

meira precipitação, assim como o sistema de produção.

Queiroz et al. (2011), realizando simulações de chuva às 24 e 48 horas após a aplicação do glifosato, com intensidades de 136 mm h^{-1} e 173 mm h^{-1}, respectivamente, detectaram o glifosato no primeiro dia e nas primeiras amostragens do segundo dia de simulação de chuva. Na lixiviação, o herbicida foi detectado apenas na simulação realizada no primeiro dia. No entanto, quando o transporte foi avaliado em termos das cargas de glifosato, verificou-se a lixiviação cerca de 9 vezes superior à do escoamento superficial. Nessas condições, o glifosato poderia representar um risco de degradação de águas subterrâneas, principalmente quando o nível do lençol freático estiver próximo da superfície e chuvas intensas ocorrerem imediatamente após a aplicação da substância.

Bengtson et al. (1990) estudaram os herbicidas atrazina e metolachlor em condições de pós-emergência da cultura do milho. Os resultados de dois anos de trabalho revelaram que a drenagem subterrânea reduziu as perdas dos dois herbicidas, principalmente por escoamento superficial ou enxurrada, da ordem de 55% e 51%, respectivamente, para atrazina e metolachlor. As perdas dos herbicidas chegaram a 75% depois de 30 dias após a aplicação dos produtos no solo.

Da mesma forma, Cruciane et al. (1996) verificaram o efeito de um sistema de drenagem subterrâneo sobre o arraste lateral, lixiviação e contaminação do lençol freático para o herbicida trifluralina aplicado em pré-emergência na cultura do milho. Os resultados obtidos das avaliações efetuadas na superfície do solo, na profundidade de 0 - 15 cm e na água de drenagem, permitiram concluir, principalmente, que a drenagem subterrânea funciona como redutor da lixiviação superficial do herbicida, diminuindo assim os riscos de contaminação ambiental.

Armas et al. (2007) detectaram acetochlor, ametryn, atrazine, clomazone, diuron, glyphosate hexazinone, isoxaflutole, pendimethalin, simazine, sulfentrazone, tebuthiuron e trifluralin em água superficial e sedimentos do Rio Corumbataí, região produtora de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, em diferentes épocas do ano. Os autores verificaram que as triazinas foram os maiores contaminantes, principalmente em função da persistência no solo e da solubilidade em água.

Pinho (2003) verificou que a ausência de horizonte orgânico sobre a superfície do solo proporcionou o aumento de cinco vezes na velocidade de escoamento e reduziu em 13,6% a retenção do herbicida atrazina.

Alguns trabalhos de monitoramento ressaltam a contaminação de águas superficiais, em áreas adjacentes às lavouras de arroz irrigado. Em estudo realizado por Battaglin et al. (2000), foi verificado que, em áreas de sequeiro nos EUA, do total de 130 amostras de águas superficiais analisadas, em 83% foi encontrado, pelo menos, um herbicida pertencente ao mecanismo de ação de inibidores da acetolactato sintase (ALS), comum nesta cultura; destes, destaca-se a presença do herbicida imazetapir em 72% das amostras. Também foram encontrados acetocloro (95%), alacloro (89%) e atrazina (99%).

Para a análise do risco de contaminação de águas superficiais, o método de Goss (Goss, 1992) reúne um conjunto de critérios, em que é considerada a meia-vida do herbicida no solo (t½), o coeficiente de adsorção ao carbono orgânico (Koc) e a solubilidade em água (Sw). Segundo esse método, o transporte de agrotóxicos pode ser separado em dois grupos: transporte de agrotóxicos dissolvidos em água e transporte adsorvido ao sedimento, sendo classificados como de alto, médio e baixo potencial.

Brito et al. (2012) avaliaram o risco de contaminação de águas superficiais e subterrâneas por herbicidas (especialmente diuron e ametrina) no alto da Sub-Bacia do Rio Poxim. A análise de risco foi realizada mediante critérios da *Environmental Protection Agency* (EPA), índice de GUS e método de GOSS. Observou-se que vários ingredientes ativos sofrem risco de lixiviação, demonstrando a importância do monitoramento do rio para controle tanto da qualidade da água como da frequência e do volume de herbicidas aplicados na região. A partir do resultado, foi realizado um monitoramento bimensal, de julho de 2009 a julho de 2010, em dois pontos de amostragem. As amostras de água foram analisadas em laboratório, e, constatou-se a presença de diuron e ametrina. Também foi constatado que ocorreu aumento nas concentrações dos herbicidas na água superficial, durante o período chuvoso, provocado possivelmente pelo escoamento superficial.

Para Watts et al. (2000), picos de concentrações em águas superficiais são registrados logo após eventos de chuva de alta intensidade, especialmente quando as áreas ao redor dos mananciais tenham sido recentemente tratadas com altas doses de agrotóxicos.

Martini et al. (2012) estimaram a probabilidade de contaminação de águas subterrâneas e superficiais por agrotóxicos, baseados nas características físico-quí-

micas, com auxílio de modelos e parâmetros matemáticos preexistentes. Para a análise do risco de contaminação de águas superficiais, foi utilizado o método de Goss, o qual é dividido em dois grupos: potencial de transporte de agrotóxicos dissolvidos em água e adsorvido ao sedimento.

Os critérios utilizados para avaliar o potencial de lixiviação foram os sugeridos pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA e pelo Índice de GUS. Os resultados obtidos neste trabalho permitiram que os autores concluíssem que o uso de modelos de predição do comportamento de agrotóxicos é útil para se obter uma estimativa do risco de contaminação ambiental, pois alguns resultados de monitoramentos confirmam a tendência do comportamento de certos agrotóxicos no ambiente.

Marchezan et al. (2007) e Silva et al. (2009) verificaram que 50% das amostras de água coletadas em áreas de cultivo de arroz continham o herbicida clomazone em concentração máxima de 7,72 μg L^{-1}. Marchezan et al. (2007) também detectaram os herbicidas utilizados na cultura do arroz, quinclorac e propanil, em água superficial, em resíduo máximo de 6,6 e 12,9 μg L^{-1}, respectivamente.

De acordo com Santos et al. (2013), no Brasil, por meio da Resolução 357 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, são estabelecidos limites máximos de produtos fitossanitários em água. No entanto, apenas os seguintes herbicidas são mencionados na resolução: alachlor (20,0 μg L^{-1}), atrazine (2,0 μg L^{-1}), 2,4-D (4,0 μg L^{-1}), glyphosate (65,0 μg L^{-1}), simazine (2,0 μg L^{-1}) e trifluralin (0,2 μg L^{-1}).

5.3 Volatilização

A volatilização é o processo pelo qual o agrotóxico presente na solução do solo passa para a forma de vapor, podendo perder-se para a atmosfera por evaporação. O potencial de volatilização de um herbicida pode ser estimado através da estrutura química, peso molecular, e pressão de vapor (OLIVEIRA JR.; REGITANO, 2009).

Uma vez na atmosfera, o agrotóxico poderá ser transportado a grandes distâncias e ser novamente depositado à superfície por meio do vento (deposição seca) e/ou por deposição úmida (chuva, orvalho, neve e neblina) (GAVRILESCU, 2005),

podendo esse herbicida, na fase de vapor, contaminar o ambiente e atingir organismos não alvos. No meio ambiente, os agrotóxicos podem afetar e contaminar a biota, a qualidade da água e do ar, a produtividade e a qualidade final dos alimentos de origem animal e vegetal, podendo torná-los impróprios para o consumo (SCHREIBER et al., 2013). A volatilização é uma das principais formas de perdas de herbicidas e tem sido associado com a remoção de 90% do que é aplicado na agricultura, dependendo das condições ambientais (TAYLOR; SPENCER, 1990).

Os fatores que mais influenciam na volatilização são o aumento da temperatura, principalmente para produtos com alta pressão de vapor e aumento na umidade do solo, pois a água funciona como interface entre a molécula e as partículas do solo (OLIVERIA JR.; REGITANO 2009).

Schreiber et al. (2013) conduziram dois experimentos com o objetivo de avaliar a suscetibilidade de pepino, melão, milho, sorgo e arroz a diferentes formulações do herbicida clomazone na fase vapor. Para isso, foram utilizadas caixas de vidro hermeticamente fechadas, com a presença de diferentes formulações de clomazone e as espécies vegetais. As formulações utilizadas foram Gamit 360 CS®, Gamit 500 EC® e Gamit Star®. Com os resultados obtidos, foi possível concluir que, dentre as espécies avaliadas, independentemente da formulação utilizada, a de menor tolerância ao herbicida clomazone na fase vapor foi o sorgo, seguido do milho e do arroz.

A volatilização e a deriva são problemas comuns aos herbicidas mimetizadores da auxina. Devido a este fato, Sciumbato et al. (2004) conduziram estudos no Texas, tanto em campo como em casa de vegetação, para quantificar a volatilização e o subsequente movimento de 2,4-D, dicamba e triclopyr para áreas não alvos. Demonstraram que as subdoses dos herbicidas provocaram fitotoxidade na cultura da soja, e que esta resposta foi maior em campo do que em casa de vegetação. Este fato ocorreu, pois no campo a temperatura do ar chegou a 38°C, enquanto que a temperatura da casa-de-vegetação nunca excedeu a 29°C.

O Departamento de Agricultura de Minnesota estabeleceu uma data limite para aplicar o herbicida dicamba e proibiu as aplicações quando a previsão da temperatura for superior a 29°C. As regras destinam-se a reduzir os casos de danos a áreas não alvo, fato que pode prejudicar os campos vizinhos e que tem sido um problema nos estados de cultivo de soja e algodão em todo EUA neste ano (DEMILLO, 2017).

O dicamba foi detectado no ar em grande quantidade, no periodo de 0 a 12 horas após a aplicação. No entanto, o total detectado após 48 horas foi menor para aplicações realizadas no periodo noturno (5 microgramas [mg]) em comparação com a aplicação realizada ao meio-dia (17 mg) ou no periodo da manhã (14 mg). Além disto, a temperatura média do ar ambiente (e outras variáveis do tempo) correlacionou-se com maiores níveis de detecção de dicamba no ar (MUILLER et al., 2013).

5.4 Deriva

A deriva de herbicidas através de pulverizações pode ser definida como o movimento da molécula a partir da área-alvo para áreas onde a aplicação não foi destinada. Esse transporte ocorre através do movimento de gotas de pulverização ou de vapores, podendo causar injúrias ou resíduos proibidos em plantas vizinhas suscetíveis, reduzindo a produtividade e afetando a morfologia dessas culturas (LUCHINI, 2004). A deriva também reduz a eficácia do controle químico em plantas daninhas, fato que muitas vezes é compensando através do aumento da dosagem dos produtos, resultando em gastos desnecessários e impactando na pressão de seleção de biótipos resistentes (FERREIRA et al., 2008).

A deriva de herbicidas auxínicos vem ganhando destaque em virtude da iminência da liberação de variedades transgênicas de milho, soja e algodão tolerantes ao 2,4 D e dicamba, que resultará no aumento significativo da utilização desses produtos. A deriva de 2,4 D e de dicamba pode resultar em perdas quantitativas e qualitativas na produção de culturas sensíveis plantadas em áreas adjacentes a eventos transgênicos que utilizam esses herbicidas. Isso ocorre pelo alto potencial desses produtos em ocasionar efeitos fitotóxicos sobre plantas suscetíveis, como, por exemplo, algodão, tomate e soja convencional (EVERITT; KEELING, 2012).

Como alternativa para redução de derivas, podem-se utilizar novas formulações com modificações em relação à original, as quais, através da alteração de um sal e/ou de outros inertes, resultam em redução da deriva. A formulação 2,4 D colina, por exemplo, apresenta em sua constituição o sal colina, o qual promove o aumento da concentração de íons na solução de aplicação induzindo maiores interações de repulsão e atração dos compostos de diferentes cargas dentro da calda

de pulverização. Isso ocorre, pois a formulação colina apresenta três radicais metil em sua estrutura. Essa composição química exerce maior influência na dinâmica de ânions do que dos cátions, em virtude da maior complexidade e do tamanho das estruturas metil. Dessa forma, a calda de pulverização apresenta em sua constituição maior densidade molecular, resultando em menor capacidade de arraste da formulação 2,4 D colina quando comparada com a formulação 2,4 D amina; por conseguinte, essa nova formulação está menos suscetível à deriva (CHRISTOFFOLETI, 2015).

Gandolfo et. al. (2012) estudaram o potencial de deriva do herbicida 2,4-D na formulação amina, através de um experimento em túnel de vento com 20 m de comprimento e secção transversal de 4 m^2. Nessa unidade experimental, os autores realizaram a aplicação do herbicida 2,4-D na formulação amina sobre a velocidade do vento de 2,0 $m.s^{-1}$ (velocidade constante). Dentro desse túnel, foram posicionados pontos de coleta da calda de pulverização a 5; 10 e 15 m de distância da barra de pulverização. Na calda de pulverização, foi adicionada uma solução de NaCl. Após a aplicação dos tratamentos, os coletores foram levados para análise de laboratório, e mediante a técnica de condutividade elétrica houve a mensuração da quantidade de herbicida depositada nos coletores. A deriva do herbicida 2,4 D não apresentou diferença estatística. No entanto, verificou-se quantidade de 2,4 D próximas a 60%, 40% e inferiores a 40%, para as distâncias de 5 m, 10 m e 15 m, respectivamente.

Johnson et al. (2012), também verificaram esse potencial de deriva de herbicidas auxínicos e os danos sobre culturas sensíveis. Quando aplicaram os herbicidas dicamba (D= 280 g i.a ha^{-1}) e 2,4-D na formulação amina (D=540 g i.a ha^{-1}), nas doses de 1/2 D, 1/8 D, 1/32 D, 1/128 D e 1/512 D, foi simulada a deriva sobre as culturas do algodão, amendoim e soja Os autores realizaram avaliações de fitotoxidade e correlacionaram essas injúrias visuais com o rendimento da cultura. Sintomas severos de fitotoxidade foram observados logo nas duas primeiras semanas após a aplicação dos tratamentos para todas as culturas, e ao final do experimento verificou-se redução na produtividade, nas doses mais elevadas. Os autores reforçam a necessidade de adotar precauções na aplicação desses herbicidas quando existem em áreas próximas culturas que são sensíveis.

Também, deve-se observar que, no momento da aplicação, as condições de clima estão adequadas, pois ocorre a inviabilização da aplicação de herbicidas quando as temperaturas são superiores a 30°C, os ventos superiores a 10 km/h e a

umidade relativa menor que 50% (MILER, 2004). Sendo assim, para a aplicação de herbicidas, é recomendado maior calma no ambiente, ou seja, com temperaturas amenas e velocidade do vento menor que 3 km/h.

A tecnologia de aplicação exerce grande impacto na deriva de herbicidas, por exemplo, a utilização de pontas de pulverização não apropriadas e/ou inadequadas podem culminar em maior transporte desses produtos no ambiente, em detrimento do tamanho de gotas obtidas. Nas aplicações de dicamba e 2,4-D, deve-se evitar a utilização de pontas do tipo XR, pois estas proporcionam gotas extremamente pequenas, passíveis de serem transportadas com maior facilidade pelo vento. Em contraposição, as pontas do tipo TTI, AI, Hypro Ultra Lo-Drift (ULD) e MUG são mais adequadas para a pulverização desses herbicidas, uma vez que geram gotas mais grossas, fato que não afeta a eficácia de controle do dicamba e do 2,4 D sobre plantas daninhas, ao mesmo tempo em que reduz os efeitos fitotóxicos desses produtos através da deriva sobre culturas sensíveis.

5.5 Contaminação de Tanque

A aplicação de herbcidas requer cuidados, pois alguns desses produtos podem deixar resíduos no taque de pulverização, ocasionando uma contaminação que pode ser temporária; no enetato, pode ocasinar danos em aplicações futuras, principalemente quando a próxima utilização do pulverizador for relacioanda a uma cultrua sensível ao herbicida que deixou reisdual no tanque de pulverização.

Para evitar esses problemas relativos à contaminação de tanques, são necessários alguns cuidados em relação a esses produtos que devem ser tomados. Em especial, após a aplicação de dicamba e 2,4-D, pois em aplicações através de equipamentos de campo, quando não ocorre a limpeza adequada desses equipamentos, pode ocorrer o acúmulo e/ou a deposição de resíduos desses herbicidas auxínicos em quantidade suficiente para culminar efeitos fitotóxicos em plantas sensíveis, como, por exemplo, a cultura da soja (BOERBOOM 2004; THOMPSON et al. 2007)

Dessa forma, a limpeza dos equipamentos de pulverização, após a aplicação de produtos auxínicos, deve ser incluída no procedimento de aplicação. Recomenda-se usual limpeza de tanques de pulverização após a aplicação de herbicidas,

e que seja removido todo o resíduo do tanque e realizada nele uma tríplice lavagem do tanque, objetivando dessa forma a máxima limpeza do tanque de pulverização. É recorrente para o herbicida dicamba, a adoção de um cuidado adicional, pois além da tríplice lavagem pode ser necessária, para a correta limpeza e eliminação desse herbicida do tanque de pulverização, prática recorrente, a utilização de amônia a 1% do volume total de água destinado à limpeza.

Em estudo de simulação de contaminação, Inman et al. (2018) comprovaram o potencial de contaminação de tanques de pulverização através do dicamba, pois verificaram que, mesmo após três lavagens do tanque com água, ainda permaneceu no tanque um resíduo superior a 0,3 ppm de dicamba, independentemente do sistema utilizado (água ou adição de amônia). Os pesquisadores também não verificaram diferença na limpeza de tanques mediante a utilização de amônia e somente água. Os autores também verificaram uma remoção gradativa dos resíduos do tanque de pulverização através de lavagens gradativas, sendo de 79%, 95% e 99,6% de remoção através de uma, duas e três lavagens, respectivamente. Ou autores alertam também para o potencial de fitoxicidade em plantas sensíveis, sendo que o maior potencial foi observado para cultura do tabaco, que mesmo mediante a 0,3 ppm foram observadas injúrias.

Logo, a limpeza inadequada dos tanques de pulverização pode resultar em contaminação de culturas sensíveis e essa contaminação pode ser potencializada quanto maior for o tempo de espera da calda dentro do tanque de pulverização, como, por exemplo, a situação de overnight, quando a calda pode permanecer dentro do tanque de pulverização por períodos superiores a 24 horas.

6 TRANSFORMAÇÃO

6.1 Transformação biótica

A microbiota do solo inclui bactérias, fungos, actinomicetos, protozoários e algas, e pode ser considerada a fração viva da matéria orgânica. Estes microrganismos estão diretamente envolvidos na degradação da matéria orgânica, na

transformação e na disponibilidade de nutrientes para as plantas e na degradação de agroquímicos no ecossistema solo (ANGERS et al., 1993; MOORMAM, 1994). Segundo Torstensson (1980), os microrganismos podem degradar uma variedade de compostos, como polissacarídeos, proteínas, lipídeos, aminoácidos, e até mesmo materiais mais complexos, ceras, resíduos de plantas, além de compostos químicos que são sintetizados pelo homem.

A diversidade e a densidade dos microrganismos no solo dependem das condições ambientais, sendo que diferentes solos podem ter populações distinguíveis, e qualquer modificação ambiental favorecerá uma mudança na população microbiana. Além do manejo do solo, o uso de agrotóxicos também provoca modificações na microbiota, através de seus efeitos sobre os fatores do solo e da planta, que podem favorecer ou desfavorecer a proliferação de espécies, induzindo a comunidade a um novo equilíbrio microbiano (GAUR; MISRA, 1978; PERCICH; LOCKWOOD, 1978; HICKS et al., 1990; DE CAL et al., 1993).

De acordo com Monteiro (2001), a introdução de um herbicida contendo C, N ou P no solo pode ser utilizado como nutriente e ser degradado por catabolismo ou cometabolismo. No catabolismo, a biomassa microbiana aumenta à custa do substrato, que diminui consideravelmente, uma vez que o herbicida absorvido é quebrado em moléculas menores, fornecendo energia. Já no cometabolismo, ocorre uma transformação do pesticida através de reações metabólicas, onde normalmente não ocorre uma transformação total da molécula herbicida, e este não serve como fonte de energia para os microrganismos, sendo necessário um segundo substrato para ser utilizado como fonte de carbono e de energia (ALEXANDER, 1981).

A principal determinante da degradação dos herbicidas é a atividade dos microrganismos do solo, que ditam a taxa e a extensão nas quais os herbicidas são degradados. Os principais degradadores de herbicidas relatados são os fungos e as bactérias, responsáveis pela transformação completa dos produtos, dando origem a gás carbônico, água e sais minerais, ou incompleta, originando metabólitos, que podem ser mais ou menos tóxicos que a molécula original (MONTEIRO, 2001).

A maioria dos compostos xenobióticos utilizados na agricultura não se perpetuam no ambiente em razão dos processos de degradação ou de transformação de pesticidas, geralmente microbiana, que ocorre principalmente no solo, reduzindo o esqueleto orgânico a CO2 e a outros metabólitos (KOBAYASHI; RITTMANN,

1982). Entretanto, o uso demasiado de agrotóxicos pode sobrecarregar a capacidade metabólica dos microrganismos, possibilitando o movimento de resíduos tóxicos pelo solo, atingindo as águas subterrâneas.

Segundo Kobayashi e Rittmann (1982), alguns estudos da relação microrganismos pesticidas têm enfocado principalmente aspectos relacionados à degradação destes compostos pelos microrganismos, buscando compreender os mecanismos para se evitar o bioacúmulo dos mesmos, bem como os efeitos destes produtos sobre a atividade microbiana e processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no solo. Uma alternativa para calcular a permanência destes compostos ou a mineralização é através de estudos de meia-vida e de ensaios de mineralização. A biodegradação também pode ser comprometida de acordo com as características do solo, do composto e do ambiente.

De acordo com Totola e Chaer (2002), a atividade respiratória e o carbono da biomassa microbiana podem servir associadamente, como indicadores da qualidade do solo, mostrando desequilíbrios positivos ou negativos. Para Reis et al. (2008), o CO_2 oriundo do solo, que é proveniente da atividade microbiológica, aumenta de acordo com a intensidade da atividade dos microrganismos, e devem-se priorizar esses indicadores devido à rápida resposta que os microrganismos do solo apresentam após um pequeno distúrbio.

Um dos principais fatores antropogênicos com potencial de atuar sobre a microbiota dos solos agrícolas é a utilização de herbicidas para o controle de plantas infestantes (SANNINO; GIANFREDA, 2001).

Santos et al. (2005) constataram que há uma redução na biomassa microbiana nos primeiros anos após a aplicação de um novo herbicida, uma vez que há um impacto direto aos microrganismos; entretanto, decorrido algum tempo, a flora microbiana adapta-se à nova condição, predominando estirpes que se adaptaram à degradação do herbicida, havendo novamente um equilíbrio na população microbiana.

Castro Júnior et al. (2006), utilizando glifosato, verificaram um incremento na densidade de bactérias e efeito negativo na população de fungos, sendo que isso pode ser devido à interferência de condições climáticas (altas temperaturas, falta ou excesso de chuvas), tipo de solo e também porque os fungos podem apresentar dificuldade para metabolizar o carbono como substrato.

A atividade dos microrganismos do solo pode ser estimulada devido à apli-

cação do herbicida glifosato, conforme observado por Haney et al. (2000), onde este aumento ocorreu devido aos microrganismos utilizarem o herbicida como fonte de carbono e nitrogênio, com posterior mineralização.

Avaliando a resposta de diferentes grupos de microrganismos ao bentazon, em doses variando de 10 a 100 ppm, Marsh et al. (1978) observaram reduções temporárias em diversas populações de bactérias e de fungos celulolíticos; entretanto, também observaram incremento de populações de outros fungos e actinomicetos. Além disso, nas maiores doses deste herbicida, houve redução na produção de dióxido de carbono. Reis et al. (2008), estudando a comunidade microbiana do solo rizosférico de cana-de-açúcar, constataram que a utilização de herbicidas pode modificar as proporções populacionais da microbiota do solo.

Um aspecto de grande importância e que deve ser levado em consideração na avaliação dos impactos dos agrotóxicos sobre a microbiota é a reversibilidade dos efeitos dos pesticidas no solo. Domsch et al. (1983), citados por Moreira e Siqueira (2002), analisando diversos estudos publicados, verificaram que, na maioria dos casos avaliados, os microrganismos recuperaram-se do estresse promovido pelos agrotóxicos em menos de 30 dias, sendo que, em apenas dois casos, foram necessários mais que 60 dias para que a população se recuperasse ao nível da testemunha, concluindo que, de modo geral, há efeitos de curta duração dos agrotóxicos sobre a biota.

Já a fitorremediação envolve o emprego de plantas, de sua microbiota associada e de amenizantes (corretivos, fertilizantes, matéria orgânica, etc.) do solo, além de práticas agronômicas que, se aplicadas em conjunto, removem, imobilizam ou tornam os contaminantes inofensivos ao ecossistema (ACCIOLY; SIQUEIRA, 2000). Esta técnica pode ser uma alternativa para reduzir o efeito de herbicidas em culturas sucedâneas suscetíveis (PIRES et al., 2003).

A planta utilizada com este objetivo deve apresentar porte alto, alta produção de biomassa, rápido crescimento, fácil controle e sistema radicular profundo e vigoroso (ACCIOLY; SIQUEIRA, 2000). A capacidade transpiratória elevada, visando ao carreamento do composto tóxico para a parte aérea e, ainda, sua consequente metabolização ou acúmulo nos tecidos, também é uma característica importante (VOSE et al., 2000). Plantas que apresentam maior excreção de exsudatos contribuem para o aumento da densidade de microrganismos próximos às raízes, o que

pode estimular a degradação dos produtos químicos.

Wilson et al. (2000) testaram duas espécies ornamentais (*Acorus gramenius e Pontederia cordata*) em relação à fitotoxidade, absorção e distribuição de 14C-simazine e verificaram que a atividade de simazine na solução foi reduzida a 45 e 34%, em sete dias na presença de *A. gramenius e P. cordata*, respectivamente, sugerindo serem elas eficientes na fitorremediação de simazine.

6.2 Transformação abiótica

A fotodegradação é de ocorrência muito comum, sendo um processo de decomposição que ocorre devido à absorção de luz solar (luz UV visível- comprimento de onda de 290 – 450 nm) pelo herbicida, principalmente em herbicidas de solo, resultando na excitação dos seus elétrons, rompendo algumas de suas ligações químicas, o que, consequentemente, irá afetar negativamente sua ação. Herbicidas considerados fotodecompostos são aqueles que absorvem comprimentos de luz maiores que 300 nm (Figura 5).

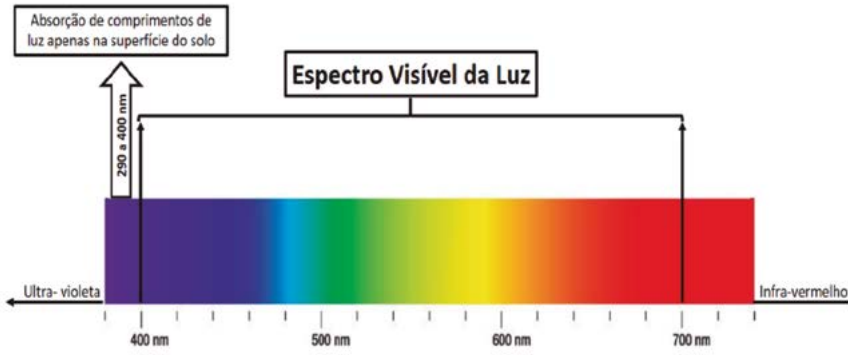


Figura 5. Espectro de Comprimento de Luz e a Relação com a Degradação de Herbicidas

Teixeira e Canela (2007) avaliaram a degradação do herbicida Padron® (corante e picloram) por processos fotoquímicos utilizando radiação artificial e solar. A Fotólise foi observada usando apenas uma lâmpada germicida (GL), promovendo a

degradação de 69% do corante e 73% do pesticida após 60 min de experimento. A luz negra (BL) e H2O2 (172 mmol L^{-1}) promoveram a conversão de 49% e 6% de corante e picloram, respectivamente.

A hidrólise é, provavelmente, a mais importante reação química de transformação de herbicidas. A hidrólise química é acelerada em baixos valores de pH, pela presença de substâncias húmicas (QIAO et al., 1996; KRUTZ et al., 2010), e por maiores temperaturas (ANDRÉA et al., 1997). A hidrólise refere-se à quebra de ligações químicas e a incorporação de componentes da água (H+ ou OH-) na estrutura molecular do herbicida (CHRISTOFOLLETI; LOPEZ-OVEJERO, 2008). Oliveira et al. (2005) verificaram que a hidrólise do flazasulfuron foi dependente da temperatura e do pH, seguindo modelo de primeira ordem. A meia-vida do herbicida em solução aquosa variou de 0,76 hora a 35 °C e pH 3 a 167,4 horas a 25 °C e pH 5.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a aplicação de herbicidas no ambiente, eles se tornam suscetíveis a fenômenos de transporte, retenção e transformação. A maior expressividade desses fenômenos está diretamente ligada às características do ambiente de aplicação e à associação dessas informações com as propriedades físico-químicas dos produtos. Dessa forma, para maior eficácia de controle de plantas daninhas através de herbicidas e/ou para uma correta predileção do destino final desses produtos no ambiente, é fundamental amplo conhecimento das características dos herbicidas, o qual está sendo posicionado em campo e uma correlação com as variáveis do ambiente de produção.

REFERÊNCIAS

ACCIOLY, A. M. A.; SIQUEIRA, J. O. Contaminação química e biorremediação do solo. In: Novais R.F. et al. **Tópicos em ciência do solo**, p. 299-352, 2000.

ALEXANDER, M. Biodegradation of chemicals of environmental concern. **Science**,

v. 211, p. 132- 138, 1981.

ALONSO, D. G. et al. Sorption-desorption of indaziflam in selected agricultural soils. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 59, p. 3.096-3.101, 2011.

ANDREU, V.; PICO, Y. Determination of pesticides and their degradation products in soil: critical review and comparison of methods. **Trends in Analytical Chemistry**, v. 23, p. 772-789, 2004.

ANDRÉA, M. M. et al. Effect of temperature on dissipation of [^{14}C]-atrazine in a brazilian soil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, p. 95-100, 1997.

ANGERS, D. A. et al. Tillage-induced differences in organic matter of particle-size fractions and microbial biomass. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57, p. 512-516, 1993.

ARMAS, E. D. et al. Diagnóstico espaçotemporal da ocorrência de herbicidas nas águas superficiais e sedimentos do Rio Corumbataí e principais afluentes. **Química Nova**, v. 5:1.119-1.127, 2007.

BATTAGLIN, W. A. et al. Occurrence of sulfonylurea, sulphonamide, imidazolinone and other herbicides in rivers,reservoirs and ground water in the Midwestern United States, 1998. **Science Total Environmental**, v. 248, p. 123-133, 2000.

BENGTSON, R. L. et al. The influence of subsurface drainage practices on herbicide losses. **Transactions of the ASAE**, v. 33, p. 415-518, 1990.

BONFLEUR, E. J. et al. Organomineral interactions and herbicide sorption in brazilian tropical and subtropical Oxisols under no-tillage. **Journal Agriculture Food Chemical**, v. 64, p. 3925–3934, 2016.

BOUCHARD, D. C. et al. Mobility and persistence of hexazinone in a forest watershed. **Journal of Environmental Quality**, v. 14, p. 229-233, 1985.

BRITO, F. B. et al. Herbicidas no alto Rio Poxim, Sergipe e os riscos de contaminação dos recursos hídricos. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, p. 390-398, 2012.

CARVALHO, L. B. **Herbicidas**. Editado pelo autor: Lages-SC, 2013.

CASTRO JR, J. V. et al. Avaliação do herbicida glifosato na microbiota do solo. Pesticidas: **Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, v. 16, p. 21-30, 2006.

CAVENAGHI, A. L. et al. Dinâmica do herbicida amicarbazone (Dinamic) aplicado sobre palha da cana-de-açúcar (*Saccarum officinarum*). **Planta Daninha**, v. 25, p. 831-837, 2007.

CHRISTOFFOLETI, P. J. et al. **Comportamento dos herbicidas aplicados ao solo na cultura da cana-de-açúcar**. Edição pelos autores: Piracicaba, 2009.

CHRISTOFFOLETI, P. J. Auxinic herbicides, mechanisms of action, and weed resistance: A look into recent plant science advances. **Scientia Agricola**, v. 72, p. 356-362, 2015.

COHEN, S. Z. et al. Offsite transport of pesticides in water – mathematical models of pesticide leaching and runoff. **Pure and Applied Chemistry**, v. 67, p. 2.109-2.148, 1995.

CORK, D. J.; KRUEGER, J. P. Microbial transformations of herbicides and pesticides. **Advances in applied Microbiology**, v. 36, p. 1-6, 1991.

CRUCIANI, D. E. et al . Comportamento de herbicida em solo de várzea com drenagem subterrânea. **Scientia Agricola**, v. 53, p. 2-3, 1996.

DAY, J. Y. et al. Determination and estimation of water solubilities and octanol/water partition coefficients for derivates of benzanilides. **Chemosphere**, v. 37, p. 1.419-1.426, 1998.

DE CAL, A. et al. Efecto de los herbicidas atracina y alacloro sobre la microflora del suelo de un monocultivo de maiz. **Investigación Agraria: Producción y Protección Vegetal**, v. 8, p. 97-108, 1993.

DE MILLO, A. **Minnesota announces restrictions on using herbicide dicamba**. Daily News, Dezembro, 2017.

DEUBER, R. **Ciência das plantas daninhas: fundamentos**. Jaboticabal: FUNEP, 1992.

DIAS, A. C. R. **Lixiviação, mobilidade, degradação, mineralização e atividade microbiana de herbicidas em função de atributos de cinco tipos de solo**. 2012. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2012.

DOMSCH, K. H. et al. An ecological concept for the assessment of side-effects of agrochemicals on soil microor¬ganisms. In: GUNTHER, F. A. (Ed.), **Residue Reviews**. Residue Reviews 86. Springer, New York, USA. 1983.

EVERITT, J. D.; KEELING, J. W. Weed control and cotton (*Gossypium Hirsutum*) response to preplant Applications of dicamba, 2,4-d, and diflufenzopyr plus dicamba. **Weed Technology**, v. 21, p. 506-510, 2007.

FERREIRA, E. A. Glyphosate translocation in hairy fleabane (*Conyza bonariensis*) biotypes. **Planta Daninha**, v. 26, p. 637-643, 2008.

FERRI, M. V. W. et al. Atividade dos herbicidas flumetsulam e trifluralin em diferentes valores de pH e densidade do solo. **Ciência Rural**, v. 30, p. 11-15, 2000.

FERRI, M. V. W. et al. Atividade do herbicida acetochlor em solo submetido à semeadura direta e ao preparo convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasieira**, v. 37, p. 1.697-1.703, 2002.

FLORIDO, F. et al. Mobilidade do herbicida imazaquin em diferentes solos. **Revista Caatinga**, v. 28, p. 54-60, 2015.

FREUNDLICH, H.; HATFIELD, H. S. Colloid and capillary chemistry, **Methuen And Co**, Ltd; London, 1926.

GANDOLFO, M. A. et al. Potencial de deriva da mistura de 2,4-D com glyphosagte. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 11, p. 332-338, 2012.

GAVRILESCU, M. Fate of pesticides in the environment and its bioremediation. **Engineering in Life Sciences**, v. 5, p. 497-526, 2005.

GAUR, A. C.; MISRA, K. C. Dynamics of microbial population in soil as influenced by simazine and ecological factors. **Zentralbl Bakteriol Naturwiss**, v. 133, p. 357-361, 1978.

GOSS, D. W. Screening procedure for soils and pesticides for potential water quality impacts. **Weed Technology**, v. 6, p. 701-708, 1992.

GUNASEKARA, A. S. et al. The behavior of clomazone in the soil environment. **Pest Management Science**, v. 65, p. 711-716, 2009.

GUSTAFSON, D. I. Groundwater ubiquity score: a simple method for assessing pesticide leachibility. **Environmental Toxicolofy and Chemistry**, v. 8, p. 339-357, 1989.

HANEY, R. L. et al. Effect of glyphosate on soil microbial activity and biomass. **Weed Science**, v. 48, p. 89–93, 2000.

HICKS, R. J. et al. Review and evaluation of the effects of xenobiotic chemicals on microorganisms in soil. **Advances in Applied Microbiology**, v. 35, p. 195-253, 1990.

INMAN, M. D. et al. Simulated sprayer tank contamination with dicamba. In: 48th TWC, TOB. WORK. CONF., 2018, **Anais...** 23. North Carolina State University, Raleigh NC USA, 2018.

INOUE, M. H. et al. Critérios para avaliação do potencial de lixiviação dos herbicidas

comercializados no Estado do Paraná. **Planta Daninha**, v. 21, p. 313-323, 2003.

JOHNSON, V. A. et al. Cotton, Peanut, and Soybean Response to Sublethal Rates of Dicamba, Glufosinate, and 2,4-D. **Weed Technology**, v. 26, p. 195-206, 2012.

KOBAYASHI, W.; RITTMANN, B.E. Microbial removal of hazardous organic compounds. **Environmental Science & Technology**, v. 16, p. 170-183, 1982.

KRAEMER, A. F. et al. Destino ambiental dos herbicidas do grupo das imidazolinonas – Revisão. **Planta Daninha**, v. 27, p. 629-639, 2009.

KRUTZ, L. J. et al. Agronomic and environmental implications of enhanced s-triazine degradation. **Pest Management Science**; v. 66, p. 461-481, 2010.

LAVORENTI, A. Comportamento de herbicidas no meio ambiente. In WORKSHOP DE BIODEGRADAÇÃO, 1996, Campinas. **Anais**.... Campinas: Embrapa, 1996. p.14-16.
LYMAN, W. J. et al. **Handbook of Chemical Property Estimation Methods, Environmental Behaviour of Organic Compounds**. McGraw-Hill: New York .1982.

LUCHINI, L. C. Dinâmica ambiental dos agrotóxicos. In: RAETANO, C. G.; ANTUNIASSI, U. R. **Qualidade em tecnologia de aplicação**. Botucatu: Fepaf, 2004. p. 36-39.

MANCUSO, M. A. C. et al. Efeito residual de herbicidas no solo ("*Carryover*"). **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 10, p. 151-164, 2011.

MARCHEZAN, E. et al. Resíduos de agrotóxicos na água de rios da Depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 40, p. 1.053-1.059, 2010.

MARSH, J. A. P. et al. Simultaneous assessment of various responses of the soil microflora to bentazone. **Weed Research**, v. 18, p. 293, 1978.

MARTINI, D. L. F. et al. Risco de contaminação das águas de superfície e subterrâ-

neas por agrotóxicos recomendados para a cultura do arroz irrigado. **Ciência Rural**, v. 42, p. 1.715-1.721, 2012.

MATALLO, M. B. et al. Lixiviação dos herbicidas tebuthiuron e diuron em colunas de solo. **Pesticidas**, v. 13, p. 83-90, 2003.

MATALLO, M. B. et al. Sorption, degradation, and leaching of tebuthiuron and diuron in soil columns. J**ournal of Environmental Science Health**, v. 40, p. 39-43, 2005.

MELO, C. A. D et al. Efeito residual de sulfentrazone, isoxaflutole e oxyfluorfen em três solos. **Planta Daninha**, v. 28, p. 835-842, 2010.

MERSIE, W. et al. Movement, adsorption and mineralization of atrazine in two soils with and without switchgrass (*Panicum virgatum*) roots. European **Journal of Soil Science**, v. 50, p. 343-349, 1999.

MILLER, P. C. H. Reducing the risk of drift from boom sprayers. In: RAETANO, C. G.; ANTUNIASSI, U. R. **Qualidade em tecnologia de aplicação**. Botucatu: FEPAF, 2004. p. 110-124.

MONTEIRO, R. T. R. Biodegradação de pesticidas em solos brasileiros. In: MELO, I. S. et al. Biodegradação. Jaguariúna: **Embrapa Meio Ambiente**, 2001. p. 1-28.

MONTGOMERY, D. R.; BUFFINGTONT, J. M. Channel-reach morphology in mountain drainage basins. **GSA Bulletin**, v. 109, p. 596-611, 1997.

MOORMAN, T. B. Pesticide degradation by soil microrganisms: environmental, ecological and management effects. In: HATFIELD, J. L.; STEWART, B. A. (Eds.). **Soil biology** - Effects on soil quality. Boca Raton: CRC Press, 1994. p. 121-169.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. UFLA/FAEPE: Lavras. 2002.

MUELLER, T. C. et al. Effect of Conditions, formulation and application time of day

on detecting dicamba in the air under field. **Weed Science**, v. 61, p. 586-593, 2013.

NEGRISOLI, E. et al. Associação do herbicida tebuthiuron com a cobertura de palha no controle de plantas daninhas no sistema de cana-crua. **Planta Daninha**, v. 25, p. 621-628, 2007.

OLIVEIRA, M. F. Comportamento de herbicidas no ambiente. In: OLIVEIRA JR, R. S.; CONSTANTIN, J. **Plantas daninhas e seu manejo**. Guaíba: Agropecuária, 2001. p.315-362.

OLIVEIRA, M. F. et al. Sorção e hidrólise do herbicida flazasulfuron. **Planta Daninha**, v. 23, p. 101-113, 2005.

OLIVEIRA JR, R. S.; REGITANO, J. B. Dinâmica de pesticidas no solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, R. F. (Eds.). Química e mineralogia do solo. Viçosa-MG: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2009. p.187-248.

OLIVEIRA, M. F.; BRIGHENTI, A. M. Comportamento dos herbicidas no ambiente. In: OLIVEIRA JR, et al. (Eds.). **Biologia e Manejo de plantas daninhas**. Curitiba: Omnipax, 2011, p.263-304.

PASQUALETTO, A. et al. Avaliação de lixiviado de imidazolinona por meio de bioensaio. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 29, p. 1-5, 1999.

PEREIRA, G. A. M. et al. Clomazone leaching estimate in soil columns using the biological method. **Planta Daninha**, v. 35, p. 1-7, 2017.

PERCICH, J. A.; LOCKWOOD, J. L. Interaction of atrazine with soil microorganisms: population changes and accumulation. **Canadian Journal of Microbiology**. v. 24, p. 1.145-1.152, 1978.

PESSOA, M. C. P. Y. Software AGROSCRE - Apoio à avaliação de tendências de transporte de princípios ativos de agrotóxicos. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambien-

te, Embrapa meio Ambiente. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**. v.26, p.24, 2004.

PIRES, F. R. et al. Fitorremediação de solos contaminados com herbicidas. Planta Daninha, v. 21, p. 335-341, 2003.

_____. Inferências sobre a atividade rizosférica de espécies com potencial para fitorremediação do herbicida tebuthiuron. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, v. 29, p. 627-634, 2005a.

_____. Fitorremediação de solos contaminados com tebuthiuron utilizando-se espécies cultivadas para adubação verde. **Planta Daninha**, v. 23, p. 711-717, 2005b.

PINHO, A. P. **Retenção de atrazine e picloran no escoamento superficial em zonas riparias de área de silvicultura**. 2003. 124 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em engenharia agrícola. Viçosa, UFV, 2003.

PRATA, F. et al. Miscible displacement, sorption and desorption of atrazine in a brazilian oxisol. **Vadose Zone Journal**, v. 2, p. 728-738, 2003.

PRATA, F. et al. Glyphosate sorption and desorption in soils with distinct phosphorus levels. **Scientia Agricola**, v. 60, p. 175-180, 2003.

PROCÓPIO, S. O. et al. Potencial de espécies vegetais para a remediação do herbicida trifloxysulfuron-sodium. **Planta Daninha**, v. 23, p. 9-16, 2005.

_____. Sorção do herbicida atrazine em complexos organominerais. **Planta Daninha**, v. 19, p. 391-400, 2001.

QIAO, X. et al. Persistence of atrazine and occurrence of its primary metabolites in three soils. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 44, p. 2.846-2.848, 1996.
QUEIROZ, G. M. P. et al. Transporte de glifosato pelo escoamento superficial e por

lixiviação em um solo agrícola. **Química Nova**, v. 34, p. 190-195, 2011.

REFATTI, J. P. et al. Leaching and residual activity of imidazolinone herbicides in lowland soils. **Ciência Rural**, v. 47, p. 1-6, 2017.

REGITANO, J. B. Propriedades físico-químicas dos defensivos e seu destino no ambiente. In: SIMPÓSIO SOBRE DINÂMICA DE DEFENSIVOS AGRÍCOLAS NO SOLO. **Anais**... Piracicaba, p.40-50. 2002.

_____. Propriedades físico-químicas dos defensivos e seu destino no ambiente. In: SIMPÓSIO SOBRE DINÂMICA DE DEFENSIVOS AGRÍCOLAS NO SOLO. **Anais**... Piracicaba, p.40-50. 2002.

REIS, M. R. et al. Atividade microbiana em solo cultivado com cana-de-açúcar após aplicação de herbicidas. **Planta Daninha**, v. 26, p. 323-331, 2008.

ROSSI, C. V. S. et al. Mobilidade do sulfentrazone em Latossolo Vermelho e em Chernossolo. **Planta Daninha**, v. 23, p. 701-710, 2005.

SANNINO, F.; GIANFREDA, L. Pesticide influence on soil enzymatic activities. **Chemosphere**, v. 45, p. 417-425, 2001.

SANTOS, J. B. et al. Atividade microbiana do solo após aplicação de herbicidas em sistemas de plantio direto e convencional. **Planta Daninha**, v. 23, p. 683-691, 2005.

SANTOS, E. A. et al. Resíduos de herbicidas em corpos hídricos - Uma revisão. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 12, p. 188-201, 2013.

SCHREIBER, F. et al. Plantas indicadoras de clomazone na fase vapor. **Ciência Rural**, v. 43, p. 1.817-1.823, 2013.

SCIUMBATO, A. S. et al. Determining exposure to auxin-like herbicides. I. Quantifying injury to cotton and soybean. **Weed Technology**, v. 18, p. 1.125–1.134, 2004.

SCORZA JR, R. P.; SILVA, J. P. Potencial de contaminação da água subterrânea por pesticidas na Bacia do Rio Dourados-MS. Pesticidas: **Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, v.17, p. 87-106, 2007.

SCORZA JR, R. P.; REGITANO, R. L. O. Sorção, degradação e lixiviação do inseticida tiametoxam em dois solos de Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 564-572, 2012.

SEBASTIAN, D. J. et. al. Influence of soil properties and soil moisture on the efficacy of indaziflam and flumioxazin on *Kochia scoparia* L. **Pest Management Science**, v. 73, p. 444-451, 2016.

SILVA, A. A. et al. Herbicidas: comportamento no solo. In: SILVA, A. A.; SILVA, J. F. **Tópicos e manejos de plantas daninhas**. Viçosa-MG: Universidade Federal de Viçosa, 2007. p.198- 248.

SILVA, D. R. O. et al. Monitoramento de agrotóxicos em águas superficiais de regiões orizícolas no sul do Brasil. **Ciência Rural**, v. 39, p. 2.383-2.389, 2009.

SILVA, G. R. et al. Mobilidade do fomesafen em solos brasileiros. **Planta Daninha**, v. 32, p. 639-645, 2014.

SILVA, A. A. et al. Comportamento de herbicidas no solo. In: MONQUERO, P. A. (Org.). **Aspectos da biologia e manejo das plantas daninhas**. São Carlos: Rima, 2014. p. 145-165.

SINDIVEG- **Sindicato Nacional da Indústria de Produtos para Defesa Vegetal**. Disponível em : < http://sindiveg.org.br/wp-content/uploads/2018/08/oquevocepreciasabersobredefensivosagricolas.pdf >. Acesso em: 06 out 2018.

TAYLOR, A. W.; SPENCER, W. F. Volatilization and Vapor Transport Processes, In: **Pesticides in the Soil Environment**. Soil Science Society of America Book Series, Madison, WI, USA, 1990. p. 213–269.

TEIXEIRA, S. C. G.; CANELA, M. C. Degradação do pesticida Padron por processos fotoquímicos utilizando luz artificial e solar. **Quimíca Nova**, v. 30, p. 1.830-1.834, 2007.

THOMPSON, M. A. et al. Soybean tolerance to early preplant applications of 2,4-D ester, 2,4-D amine, and dicamba. **Weed Technology,** v. 21, p. 882–885, 2007.

TOFOLI, G. R. et al. Dinâmica do tebuthiuron em palha de cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, v. 27, p. 815-821, 2009.

TOLEDO, R. E. B. et al. Eficácia do herbicida amicarbazone aplicado sobre a palha ou no solo no controle de plantas daninhas na cultura da cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, v. 27, p. 319-326, 2009.

TOLEDO, R. E. B. et al. Transposição e interceptação do herbicida Front pela palha da cana-de-açúcar. In: XXVIII CONGRESSO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS, 2012, Campo Grande, MS. **Anais...** XXVIII Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas, 2012. p. 637.

TÓTOLA, M. R.; CHAER, G. M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. In: ALVAREZ, V. (Ed.). **Tópicos em Ciência do Solo**. v. 2, 2002. p. 195-276.

TORSTENSSON, L. Role of microorganisms in decomposition. In: HANCE, R. J. (Ed.). **Interactions between herbicides and the soil**. London: Academic Press, 1980. 349 p.

UNIVERSITY OF HERTFORDSHIRE. The Pesticide Properties DataBase (PPDB) developed by the Agriculture & Environment Research Unit (AERU), University of Hertfordshire, 2019. Disponível em:<http://sitem.herts.ac.uk/aeru/iupac/index.htm>. Acesso em: 05 mai 2019.

VELINI, E. D. Comportamento de herbicidas no solo. In: SIMPÓSIO NACIONAL SO-

BRE MANEJO DE PLANTAS DANINHAS EM HORTALIÇAS, 1992, Botucatu. **Resumos**... Botucatu, 1992. p.44-64.

VENCILL, V. K. **Herbicide Handbook**. 8. ed. Weed Science Society of America:Lawrence, KS, 2002.

VIDAL, R. **Ação dos herbicidas**. Porto Alegre: Evangraf, 2002.

VOSE, J. M. et al. Leaf water relations and sapflow in Eastern cottonwood (*Populus detoides* Bartr.) trees planted for phytoremediation of a groundwater pollutant. **International Journal of Phytoremediation**, v. 2, p. 53-73, 2000.

WATTS, D. W. et al. Storm flow export of metolaclor from a coastal plain watershed. **Journal of Environmental Science Health**, v. 35, p. 175-186, 2000.

WEBER, J. B. Behavior of dinitroaniline herbicide in soils. **Weed Technology**, v. 4, p. 394-406, 1990.

WEBER, B. J. et. al. A proposal to standardize soil/solution herbicide distribution coefficients. **Weed Science**, v. 48, p. 75–88, 2000.

WEBER, B. J. et al. Calculating pesticide sorption coefficients (Kd) using selected soil properties. **Chemosphere**, v. 55, p. 157-166, 2004.

WIDERSON, M. R.; KIM, K. D. The pesticide contamination prevention act: setting specific numerical values. Sacramento: California Dep. Food and Agric., **Environmental Monitoring and Pest Management**, 287p. 1986.

WILSON, P.C. et al. Metalaxyl toxicity, uptake, and distribution in several ornamental plant species. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 39, p. 282- 288, 2000.

CAPÍTULO 9

SELETIVIDADE, HORMESIS E FISIOLOGIA DOS HERBICIDAS NAS PLANTAS

Fabrícia Cristina dos Reis[1]
Kássio Ferreira Mendes[2]
Luísa Baccin[3]
Vanessa Takeshita[4]
Valdemar Luiz Tornisielo[5]
Ricardo Victória Filho[6]

[1]Assistente Agropecuário I, Departamento de Sementes Mudas e Matrizes, Coordenadoria de Desenvolvimento Rural Sustentável, Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo, Campinas, SP. [2]Professor Adjunto, Departamento de Agronomia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. [3]Doutoranda em Fitotecnia, Departamento de Produção Vegetal, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP. [4]Doutoranda em Ciências (Energia Nuclear na Agricultura), Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP. [5]Professor Associado, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP. [6]Professor Titular, Departamento de Produção Vegetal, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento de como o herbicida age nas plantas deve ir além de se compreender sua forma de controle e sintomatologia. Também é importante conhecer como o herbicida é absorvido, translocado, metabolizado e, igualmente, deve-se entender como isto se relaciona a outros processos, como, por exemplo, a seletividade de herbicidas as plantas. Neste capítulo, também será tratado o efeito de hormesis de herbicidas, que é o efeito benéfico ao desenvolvimento de plantas após a aplicação de baixas doses destes compostos.

2 ABSORÇÃO E TRANSLOCAÇÃO

Para serem eficazes, os herbicidas devem ser absorvidos e translocados via xilema e/ou floema até atingir seu local de ação. A absorção dos herbicidas pode ocorrer por toda a estrutura vegetal, mas, principalmente, pela folha, caule e raízes das plantas. Diversos são os fatores que podem influenciar a absorção e translocação destes produtos, entre os quais, características físico-químicas dos herbicidas, condições dos solos, do ambiente, da tecnologia de aplicação e também das características das plantas.

2.1 Absorção de herbicidas

Quando os herbicidas são aplicados via foliar, a principal barreira para sua absorção é a cutícula foliar. Esta estrutura evoluiu nos vegetais para oferecer proteção a processos como a perda de água, ataque de insetos, altas radiações, etc. A cutícula é composta de uma matriz insolúvel de cutina, pectina, ceras cuticulares e ceras epicuticulares. Em sua camada mais externa, existe a presença de uma cera (cera epicuticular) que é composta da mistura de compostos tais como: hidrocarbonetos, alcoóis, aldeídos, cetonas, ésteres, triterpenos, flavonoides e ácidos graxos de cadeia muito longa. Já a cutina, localizada logo abaixo das ceras, é um poliéster composto de uma série de ácidos graxos hidroxilados que apresentam entre 16 e 18

carbonos. Na cutícula há a presença de pectina (Figura 1).

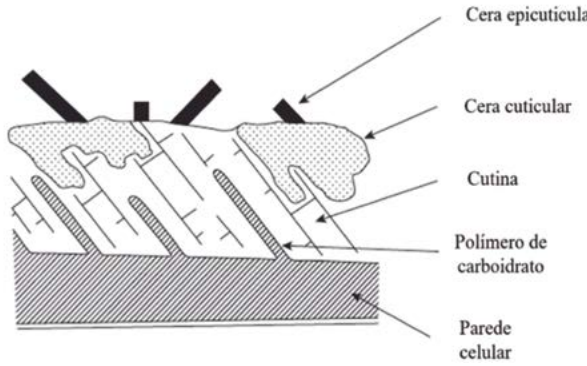


Figura 1. Esquema geral de uma estrutura cuticular.
Fonte: Adaptado de Price (1982).

A cera epicuticular pode apresentar diferentes formas, tamanhos e composição. Como supracitado, é formada basicamente por uma complexa rede de compostos alifáticos, sendo predominantemente lipofílica, ou seja, com atração a óleos e repulsão à água (BIANCHI; BIANCHI, 1990). Assim, herbicidas que são lipofílicos, com maior valor de Kow, serão absorvidos mais facilmente do que aqueles com características hidrofílicas. É importante destacar que as ceras epicuticulares não estão uniformemente distribuídas sobre a superfície foliar. Nas nervuras entre células, nas células-guarda dos estômatos e nas brotações de tricomas, estão geralmente ausentes, ou em menores quantidades, sendo os principais locais onde a absorção dos herbicidas ocorre (VALENTI et al., 2006).

Já a cutícula é uma camada tanto hidrofílica (pectina) como lipofílica (ceras). Na cutícula, há diversos canais polares que servem como rota de absorção para herbicidas bem como outras vias transcuticulares compostas de polímeros de carboidratos que se estendem na cutícula a partir da parede celular. Desta forma, fica evidente que diferentes características da cutícula foliar podem influenciar na absorção de herbicidas. Portanto, condições climáticas, estádio de desenvolvimento das plantas e diferenças entre as espécies podem influenciar na absorção destes produtos. Como exemplo, em estudo realizado por Xie et al. (1996), foi observado maior absorção de fenoxaprop-ethyl e imazamethabenz-methyl por folhas de

plantas de aveia (*Avenua fatua*) que foram submetidas a baixa intensidade luminosa. Provavelmente, a relativa menor quantidade de cera epicuticular, em condições de sombra, favoreceu a absorção dos produtos (XIE et al., 1994).

Em plantas jovens, a cutícula foliar também tende a ser menos espessa, e espera-se maior absorção foliar. Contudo, outros fatores podem influenciar na taxa de absorção, entre eles diferenças nos processos fisiológicos de acordo com o estádio de desenvolvimento da planta. Pline et al. (2001), por exemplo, observaram que a quantidade de glyphosate absorvida foi altamente dependente do estágio de crescimento das plantas de algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) no momento do tratamento. A absorção de glifosato aumentou de 19%, no estágio de 4 folhas, para 29 e 45% nos estágios de 8 e 12 folhas, respectivamente. Os autores concluíram que o aumento da absorção de glifosato, quando as plantas estavam mais desenvolvidas, foi devido a diferentes processos fisiológicos que ocorrem em diferentes estágios de crescimento. Por outro lado, Mccullough et al. (2014) observaram que diferentes estádios de desenvolvimento não influenciaram na absorção foliar de ^{14}C-dithiopyr em *Digitaria ischaemum;* porém, em menor temperatura (15/10°C; dia/noite), a absorção do herbicida foi maior que em temperaturas mais elevadas (30/25°C; dia/noite).

A absorção radicular é menos complexa que a foliar, uma vez que as raízes não possuem cutícula como as folhas. A zona que mais absorve herbicidas está na extremidade das raízes, na região onde estão presentes os pelos radiculares. Da solução do solo, após penetrarem a superfície das raízes, os herbicidas podem ser transportados via apoplasto através de interconexões das paredes celulares devido a um gradiente de concentração que é formado. Esse transporte é barrado pela Estria de Caspary, presente na endoderme da raiz; neste momento, o transporte passa a ser simplástico até ao cilindro central. As estrias de Caspary não estão presentes nos ápices radiculares das células endodérmicas jovens e na região basal das raízes laterais em desenvolvimento, sendo uma rota de passagem dos herbicidas até o cilindro central (MONQUERO; HIRATA, 2014). Também a absorção dos herbicidas pelas raízes pode ser via simplasto, movimentando-se de célula a célula até atingir o cilindro central. O simplasto pode ser definido como a interconexão as células vegetais, formando uma rede contínua, sendo interconectado pelo plasmodesmo, enquanto o apoplasto é um sistema de paredes celulares, espaços intercelulares e

vasos de uma planta (TAIZ; ZEIGER, 2013).

A absorção pode ocorrer também via caule, principalmente para herbicidas aplicados no solo, no início do desenvolvimento da plântula. Nesse estágio, a camada de cera ainda não está formada nas plantas jovens bem como também a Estria de Caspary. Esta via de absorção também ocorre após aplicação de herbicidas para controle de plantas daninhas de pastagens. Para isso, são realizados cortes no caule e aplicados herbicidas, seja por pulverizações, pinceladas, seja por injeções. Esse herbicida é transportado até à raiz, onde irá atuar em seu sítio de ação.

2.2 Translocação

Após a absorção do herbicida, ele pode ser translocado a longas distâncias pela planta via xilema (apoplasto), floema (simplasto) ou pelo xilema e floema (apossimplasto), sendo que as características físico-químicas dos herbicidas vão influenciar em qual via ele será predominantemente translocado. Os herbicidas que são aplicados nos solos e absorvidos pelas raízes podem ser translocados principalmente via xilema (apoplástica). O xilema é o principal tecido condutor de água nas plantas vasculares e não possui citoplasma ou membrana plasmática (TAIZ; ZEIGER, 2013). Nesta via de transporte, os herbicidas movimentam-se juntamente com a água, sendo uma via unidirecional, e comparada com a translocação via floema, pode ser considerada uma via simples e de baixa resistência. Os herbicidas que são translocados via xilema tendem a se acumular em folhas maduras, pois estão transpirando a maior parte da água.

Fatores que afetam o fluxo de água pelo xilema, indiretamente, podem afetar a translocação de herbicidas por esta via, podendo citar: a umidade relativa do ar, temperatura, teor de água no solo, características do vaso condutor, entre outros. McCullough et al (2014) avaliaram a distribuição de ^{14}C-dithiopyr em plantas de *D. ischaemum* após absorção radicular e observaram que, em temperatura mais altas, foram detectados 9% mais herbicida na parte aérea das plantas em comparação às raízes, mostrando que a maior temperatura do ar favoreceu a translocação do produto pelo xilema.

Diferentemente, a translocação via floema é bidirecional, isto implica que

os herbicidas que se movimentam por esta via podem atingir partes abaixo de onde foram aplicados, como as raízes, ou acima do local de aplicação. Nesta via, os herbicidas movimentam-se juntamente com os fotoassimilados e outros solutos presentes nas seivas das plantas. No floema, o transporte ocorre por fluxo de pressão osmótica, que consiste na formação de um gradiente de concentração de solutos na fonte (por síntese ou absorção) e na redução da concentração desses solutos no dreno. Inicialmente, os açúcares produzidos pelas folhas, por fotossíntese, são transportados para o floema, por transporte ativo, aumentando a concentração. Isto faz com que a água presente no xilema se direcione para o floema, causando um aumento de tugor. A água com os solutos dissolvidos é então empurrada através do floema devido a este aumento de pressão (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Como supracitado, a translocação pelo xilema é simples e sem resistência, portanto a velocidade em que ocorre o movimento dentro deste vaso condutor é maior. Também, há compostos que são capazes de ser translocados tanto via floema como xilema (translocação via apossimplástica). Dessa forma, para que um herbicida consiga ser translocado via floema, ele deve permanecer por tempo e concentração suficientes no interior das células deste vaso. Esta capacidade de retenção está relacionada com características físico-químicas dos herbicidas. Uma característica físico-química importante, relacionada com a translocação de herbicidas pelo floema, é o fato de alguns destes compostos serem ácidos fracos, ou seja, são moléculas que são capazes de doar prótons, ficando carregados negativamente se o pH do meio for maior que seu valor de pK_a (constante de dissociação). Se o pH for menor que seu valor de pK_a, maior proporção de moléculas ficará em sua forma molecular, sem carga. Para regular o pH dentro das células, há bombas de prótons na membrana celular, que bombeiam H^+ do interior para o exterior da célula, fazendo com que o pH do citoplasma seja maior (pH ~7,5) em comparação com o pH da parede celular (pH ~5,5). Desta forma, herbicidas ácidos fracos fora do citoplasma estarão, na maior proporção, em sua forma molecular, o que facilita seu transporte pela membrana celular. Dentro do citoplasma, devido ao maior pH, as moléculas estarão ionizadas, dificultando sua passagem pela membrana celular, ficando então as moléculas aprisionadas dentro das células (BROMILOW et al., 1990).

Contudo, é importante relembrar que existem herbicidas que não são ácidos fracos e são translocados via floema. Informações da literatura indicam que,

se um determinado composto apresentar permeabilidade intermediária à membrana plasmática, este composto pode apresentar alguma mobilidade pelo floema. A permeabilidade pela membrana é estimada pelo K_{ow}. Os herbicidas com valores de Log K_{ow} entre -1 e 1 podem ser considerados móveis pelo floema depois de serem aplicados sobre as folhas (BROMILOW et al., 1990). Na Figura 2, está apresentada uma relação entre propriedades físico-químicas de compostos ácidos fracos e não iônicos para vários tipos de translocação sistêmica.

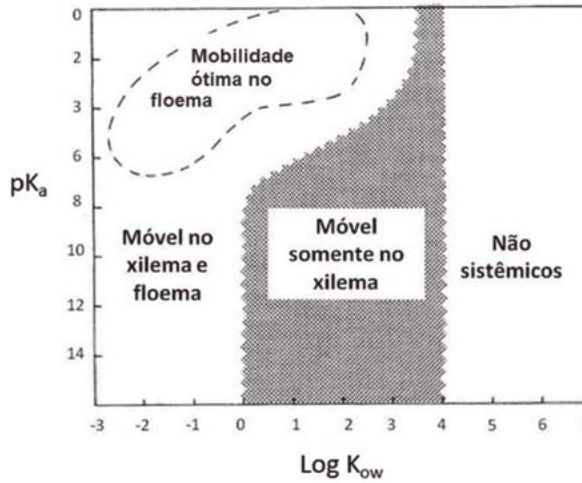


Figura 2. Propriedades físico-químicas de compostos ácidos fracos e não iônicos relacionados com a via de translocação sistêmica.
Fonte: Adaptado de Bromilow et al. (1990).

3 SELETIVIDADE DOS HERBICIDAS

O termo seletividade tem sido utilizado na agricultura desde a década de 1940, com a introdução do 2,4-D e sua seletividade para gramíneas (CUDNEY, 1996). A seletividade está relacionada com a capacidade de determinado herbicida eliminar as plantas daninhas de uma cultura, sem que esta tenha seu rendimento afetado (NEGRISOLI et al., 2004). Não apenas o herbicida é o responsável pela se-

letividade, mas a interação de diversos fatores, incluindo o ambiente, a dose e os aspectos da cultura (OLIVEIRA JR., 2001), além de outros fatores como: posicionamento na aplicação, taxas de absorção e subsequente translocação, localização (tanto dentro da planta como na região subcelular) e transformação para produtos de fitotoxidade modificada, conhecidos por metabólitos (OWEN, 1991).

A combinação ou a falta de um destes fatores citados anteriormente pode ser decisiva para uma planta daninha/ cultura apresentar seletividade a um determinado herbicida que, mesmo causando injúria, pode ser considerado seletivo, ao contrário de um herbicida de ação total, como o glyphosate, por exemplo, que causa danos e morte das plantas sem distinção (AZANIA; AZANIA, 2014).

3.1 Fatores que influenciam na seletividade dos herbicidas

Quando se pensa em seletividade, o primeiro fator relevante é o herbicida. As moléculas herbicidas contêm bastante especificidade em sua estrutura, de maneira que permite uma atividade específica distinta entre elas (CUDNEY, 1996). Cada detalhe na estrutura fornece propriedades físico-químicas distintas que favorecem, ou não, a absorção e a translocação na planta, como também nos processos comportamentais no solo, que regem o destino dos herbicidas, seja ele a planta, sejam os demais compartimentos ambientais.

É possível verificar esse efeito ao observar os herbicidas pertencentes ao grupo das imidazolinonas, que mesmo com estruturas semelhantes apresentam seletividade por culturas distintas (LADNER, 1990). O mesmo autor apresenta que imazamethabenz-methyl é seletivo e rapidamente metabolizado na cultura do trigo; enquanto o imazethapyr e imazaquin, em soja. Geralmente, como neste caso, apesar da estrutura química semelhante, a seletividade ocorre por meio da metabolização diferente em cada planta, de acordo com a fórmula estrutural da molécula.

Quando nos referimos a fatores que afetam a seletividade relacionados ao herbicida, a dose aplicada e as formulações utilizadas podem interferir no processo. A seletividade, em função da dose de aplicação de um herbicida, geralmente, é pertinente à espécie e a seu estádio de desenvolvimento, que são fatores inerentes da planta. Sullivan e Bouw (1997) verificaram que, em plantas de milho-doce, a apli-

cação de 50 g ea ha-1 de nicosulfuron entre o estádio V_5 e V_7, ocasionou injúrias severas; porém, plantas tratadas no mesmo período com 25 g ea ha^{-1} pouco foram afetadas. Contudo, quando testado outro híbrido de milho (Cargil 505), no mesmo estádio de desenvolvimento, com dosagem de nicosulfuron entre 40-80 g ea ha^{-1}, não houve redução de crescimento (FAHL; CARELLI, 1997). Em outros casos, mesmo com a aplicação de glyphosate isolado e em mistura com outros herbicidas (cloransulan-methyl, fomesafen, lactofen, clorimuron-ethyl, flumiclorac-pentyl, bentazon e imazetaphyr), em diferentes estádios de desenvolvimento da soja, não houve injúrias suficientes para reduzir o rendimento de grãos (ALONSO et al., 2013). De modo que, mesmo se aplicados na dose recomendada, o produto pode ser pouco seletivo para uma cultura, principalmente nos primeiros dias após a aplicação ou mesmo que causando injúria, ele pode ser considerado seletivo (AZANIA; AZANIA, 2014). Neste sentido, conhecer a seletividade da cultura em cada estádio de desenvolvimento é essencial para uma correta aplicação do herbicida, bem como escolher a melhor época de controle para a planta daninha.

A seletividade também pode ser alcançada quando se utiliza uma formulação contendo herbicidas com efeitos sinergísticos. Stephenson e Ezra (1987) apontam em sua revisão que estas misturas podem potencializar o efeito de controle das plantas daninhas, utilizando doses reduzidas em relação à aplicação isolada, com uma ação antagônica para os cultivos, ou seja, proteção para a cultura. Os mesmos autores citam o tridiphane como um sinergístico para atrazine em milho (WESELOH, 1983) e para metribuzin em tomate (GAUL et al., 1985). Outra maneira de a formulação ser influente na seletividade de herbicidas é pelo uso de “safeners”, os quais serão abordados mais à frente neste capítulo. Os adjuvantes também podem desempenhar papel na seletividade, pois podem promover aumento da toxicidade de um herbicida devido à melhoria na absorção dos herbicidas. Este sucesso será dependente da quantidade em que esta molécula será absorvida, sendo os adjuvantes e surfactantes participantes deste processo (AZANIA; AZANIA, 2014).

Ainda sobre o efeito do herbicida na seletividade, deve-se considerar o modo de aplicação como um fator importante. Com aplicações localizadas de herbicidas sobre a planta daninha, procurando evitar o contato com a cultura, a seletividade pode ser alcançada (OLIVEIRA JR.; INOUE, 2011). Os mesmos autores citam o exemplo do paraquat, herbicida não seletivo, que pode ser utilizado de forma

seletiva em jato dirigido. A seletividade do herbicida em relação ao posicionamento do produto é conhecida como seletividade de posição (OLIVEIRA JR.; INOUE, 2011). Azania e Azania (2014) apontaram que este posicionamento pode ser realizado, também, quando um herbicida é utilizado em pré-emergência, sendo posicionado na superfície do solo, enquanto a cultura se encontra a alguns centímetros de profundidade. Os mesmos autores indicam que o posicionamento entre linhas e dirigido, em aplicações em pós-emergência, também fazem parte desta seletividade por posicionamento.

Além do fator herbicida, a seletividade pode ser definida pelas condições ambientais no momento da aplicação, as quais também interferem no destino dos herbicidas no ambiente. A interação herbicida-solo, principalmente no caso de herbicidas aplicados em pré-emergência, define o destino do herbicida no ambiente, seja ele o transporte, a transformação, seja a retenção no solo. Solos muito argilosos e com altos teores de matéria orgânica podem reter mais o herbicida, de modo que, nestas condições, poderão estar menos biodisponíveis para a absorção, indicando possibilidade de seletividade para culturas, como também eficiência de controle. A pluviosidade pode ser favorável à seletividade, dado que, para herbicidas mais hidrofílicos, o fluxo de água no solo pode transportar o produto para camadas mais profundas. Ainda o vento, no momento da aplicação, pode, por meio da deriva, transportar o produto para outros compartimentos ambientais. Em todos os casos, a redução da concentração do produto próximo ao alvo ou cultura pode reduzir injúrias e contribuir para fatores como menor eficiência de controle e seletividade.

Fatores relacionados à planta, como morfologia e fisiologia, podem determinar a seletividade a herbicidas. A absorção diferencial, neste caso, pode ser um processo associado à seletividade, onde a superfície foliar, estrutura do dossel, forma, número e inserção foliar afetam diretamente a interceptação e a retenção do herbicida pela planta (OLIVEIRA JR.; INOUE, 2011). Segundo os mesmos autores, a idade das plantas e as cultivares também são importantes neste aspecto. Sutton (1967) aponta que a seletividade também é dependente do estado fisiológico em que a planta se encontra. Neste sentido, a translocação do herbicida varia com o transporte da molécula dentro da planta. A direção e o movimento do produto no interior da planta é dependente de características químicas, de modo que, se hidrofílico, o herbicida segue via xilema; se lipofílico, segue via floema (BLANCO et

al., 2015). No geral, plantas que apresentam algum grau de tolerância ao herbicida tendem a compartimentalizar o produto, bem como metabolizá-lo, impedindo que atinja seu local de ação.

Como a concentração do herbicida que atinge o local de ação é crucial para fitotoxidade, então qualquer fator que altere esta concentração na planta contribuirá para a seletividade. No entanto, a seletividade é um assunto complexo, geralmente baseado na exploração das diferenças entre a cultura e a planta daninha, mas atualmente o metabolismo é considerado o maior contribuinte, servindo como base para a seletividade (COBB; READE, 2011).

4 METABOLISMO DOS HERBICIDAS

Plantas mostram grandes diferenças em sua capacidade de metabolizar os herbicidas, e estas diferenças muitas vezes podem estar correlacionadas à tolerância ou suscetibilidade das espécies vegetais. De acordo com Nandula (2017), esta tolerância, principalmente em espécies de plantas cultivadas, muitas vezes está correlacionada ao metabolismo diferencial dos herbicidas. De modo que, para que a desintoxicação seja bem-sucedida, o produto químico fitotóxico (herbicida) deve ser rapidamente metabolizado para um produto menos ou não tóxico. A taxa deste processo pode decidir se uma planta sobrevive ou morre ao ataque químico. Muitas vezes, tanto a cultura como a planta daninha podem ter as mesmas vias bioquímicas, mas as taxas metabólicas são maiores na cultura (COBB; READE, 2011). Esta seletividade também pode estar relacionada com as caraterísticas dos herbicidas ou com uso de safeners junto da aplicação (OLIVEIRA JR., 2001).

No caso de plantas resistentes, o metabolismo diferencial também pode estar envolvido nos mecanismos que conferem resistência. Contudo, de acordo com Nandula (2017), as pesquisas a respeito deste assunto são mais recentes e menos aprofundadas que as baseadas na mudança dos sítios-alvo, devido à dificuldade de investigação acerca dos complexos processos metabólicos envolvidos neste mecanismo de resistência metabólica, e estas, nesta obra, estão discutidas em capítulo específico.

4.1 Fases do metabolismo de herbicidas

O metabolismo dos herbicidas pode ocorrer como um processo de três fases nas plantas, conforme descrito abaixo por Jablonkai (2015):

• **Fase I:** é o metabolismo primário para converter moléculas biologicamente ativas em compostos menos ativos (desintoxicação), conhecido por ataque metabólico, fazendo com que as moléculas mais lipofílicas adquiram caráter mais hidrofílico. Contudo, ocasionalmente, podem ser transformadas em metabólitos mais fitotóxicos (bioativação) para os "pró-herbicidas".

• **Fase II:** reações de conjugação que incluem oxidação (reação que envolve a perda de elétrons), redução (reação que envolve o ganho de elétrons) e hidrólise (degradação química da molécula realizada pela água) e produção de fenólicos, N-desmetilados, compostos de ácido carboxílico. Nas reações da fase II, os produtos da fase I são convertidos para conjugados menos tóxicos, solúveis em água por conjugação de glicosil, glutationa ou aminoácidos.

• **Fase III:** os conjugados da fase II são transformados em conjugados secundários praticamente não tóxicos ou resíduos ligados insolúveis (sequestro).

Durante a **Fase I** do processo de metabolismo diferencial, pode haver a ação do Citocromo P450 na conversão de moléculas mais hidrofóbicas em hidrofílicas, sendo que as enzimas monooxigenases deste complexo enzimático são as mais importantes no ataque metabólico (BARRETT, 2000), por meio do processo de hidroxilação. Neste complexo, um átomo de oxigênio é adicionado ao radical (herbicida), enquanto o outro oxigênio é convertido em água. Nandula (2017) evidenciou casos em que as diferentes enzimas P450 conferem seletividade para plantas cultivadas a alguns herbicidas, como, por exemplo, o metabolismo de chlorimuron-ethyl em milho (POLGE; BARRETT, 1995); bensulfuron-methyl em plântulas de arroz (DENG; HATZIOS, 2003); a conversão de fenilureias (fluometuron, linuron, chlortoluron e diuron) em compostos mais polares, em plantas de soja (SIMINSZKY et al., 1999); diclofop em três isômeros de hydroxy-diclofop em plantas de trigo (ZIMMERLIN; DURST, 1992), e chlorsulfuron, em plantas monocotiledôneas, atribuída a sua metabolização, em compostos mais polares e inativos (VASSIOS et al., 2011).

Cobb e Reade (2011) apresentaram exemplos de herbicidas metabolizados pela P450, incluindo sulfonilureias (primisulfuron, nicosulfuron, prosulfuron, triasul-

furon e chlorimuron), ureias substituídas (chlorotoluron, linuron), cloroacetanilides (metolachlor, acetochlor), triazolopirimidinas (flumetsulam), ariloxifenoxipropionatos (diclofop), benzotiadiazoles (bentazon) e imidazolinonas (imazethapyr). Ainda, os mesmos autores apontaram para o fato de que a seletividade de plantas cultivadas pode estar ligada à tolerância destas em metabolizar os herbicidas via P450, diferentemente das plantas daninhas suscetíveis. Contudo, em alguns casos, os danos às plantas só serão evitados se as próximas fases do metabolismo forem bem-sucedidas.

Correlacionada à Fase I do metabolismo secundário, a bioativação é o mecanismo de ativação de pró-herbicidas em moléculas fitotóxicas e pode ser responsável, também, pela seletividade de plantas daninhas e cultivadas. Cobb e Reade (2011) relataram que o processo de bioativação envolve a desesterificação de herbicidas que, quando propositalmente são formulados em forma de éster para facilitar a absorção, são desesterificados quando no interior celular e assumem a forma fitotóxica (como, por exemplo, o diclofop-methyl em diclofop e bromoxinil octanoato em bromoxinil). Os mesmos autores indicaram que, em alguns, casos essa desesterificação pode culminar na inativação de moléculas herbicidas (inativação de ésteres de sulfonilureias, como a inativação de chlorimuron-ethyl, por exemplo). Sendo a seletividade evidenciada pelo imazamethabenz-methyl, um herbicida inibidor da ALS, pertencente ao grupo das imidazolilnonas que, em plantas daninhas suscetíveis, é ativado inibindo a biossíntese de aminoácidos de cadeia ramificada, e em culturas resistentes (milho e trigo) a hidroxilação inativa a molécula. Contudo, em maior parte, este processo mais ativa do que inativa os herbicidas.

A bioativação pode estar relacionada também com a diferença de tolerância e suscetibilidade entre algumas espécies. Neste sentido, plantas de arroz tolerantes ao clomazone, herbicida inibidor da biossíntese de carotenoides, metabolizaram menos o herbicida (64%) do que a espécie de planta daninha *Echinochloa phyllopogon* (84%) (TENBROOK; TJEERDEMA, 2006). A metabolização do herbicida, maior para a espécie suscetível, evidenciou a formação de metabólitos mais fitotóxicos para a espécie de planta daninha do que para a cultura tolerante. No caso do clomazone, a resistência de *E. phyllopogon* pode ser devida, também, à menor metabolização do composto em metabólitos fitotóxicos ativos em relação às plantas suscetíveis (YASUOR et al., 2010).

Na **Fase II** do metabolismo, a reação de conjugação mais estudada em relação à desintoxicação de herbicidas é a conjugação da glutationa, realizada pela enzima glutationa S-transferase (GST) (COBB; READE, 2011). De acordo com os mesmos autores, a conjugação com a GST pode ser realizada se o grupo apropriado à conjugação estiver presente ou se a molécula estiver seguindo da Fase I do metabolismo. Esta conjugação com açúcares aumenta a solubilidade do herbicida em água, reduzindo sua fitotoxidade (CARVALHO et al., 2009), atuando como antioxidante por minimizar os danos na membrana por espécies reativas de oxigênio (NANDULA, 2017). Segundo Carvalho et al. (2009), os herbicidas conjugados com a GST são aqueles pertencentes ao grupo das sulfonilureias, imidazolinonas, triazias, ariloxi-fenoxi-propionatos e cloroacetanilidas, sendo ativamente transportados para o vacúolo, após a conjugação, por uma ATPase (COBB; READE, 2011).

Em relação às plantas cultivadas, Cobb e Reade (2011) apontaram que estas possuem atividade da GST mais alta do que as plantas daninhas suscetíveis, atribuindo a isto a diferença de seletividade entre elas. A cultura do milho foi relacionada ao primeiro relato da atividade da GST (FREAR; SWANSON, 1970) e ao primeiro exemplo de biotransformação de um herbicida conjugado, devido à seletividade do milho a atrazine, como principal mecanismo de tolerância da cultura (SHIMABUKURO et al., 1970), em arroz, exemplificada pela GST altamente relacionada à conjugação de acetanilida, alachlor e metolachlor (CHO; KONG, 2005). Outros exemplos de herbicidas podem ser citados como relacionados à detoxificação em plantas pela conjugação com a GST, como chloroacetamidas (milho, sorgo, trigo e arroz), atrazine (milho e sorgo), fenoxaprop, fluoroxidifen, flupyrsulfuron-methyl, dimethenamid (trigo) e o metabólito sulfóxido de EPTC (sorgo).

Em relação aos herbicidas inibidores da enzima Acetil CoA Carboxilase (ACCase), é possível citar o fenoxaprop-ethyl em trigo, em que pode ser convertido em moléculas mais solúveis, bem como a conjugação aos compostos insolúveis pela GST em aveia, quando comparada ao capim-colchão (*Digitaria ischaemum)* (LEFSRUD; HALL, 1989). Para herbicidas inibidores da enzima Protoporfirinogênio Oxidase (PROTOX), que afetam a síntese da clorofila, como o acifluorfen, que em soja apresentou ataque da homoglutationa, levando à formação de metabólitos não tóxicos nas plantas (RITTER; COBLE, 1981).

Para herbicidas inibidores da ALS, Brown et al. (1991) também relataram a

conjugação com a homoglutationa, importante na metabolização de chlorimuron-ethyl, em plântulas de soja. Ainda a respeito de herbicidas do grupo das sulfonilureias, a seletividade em trigo e cevada ao metsulfuron-methyl ocorre pela conjugação do composto ao glicosil (Fase II do metaboslismo secundário) e pela formação de um hydroxymethyl derivado da hidroxilação (Fase I do metabolismo secundário) do methyl em sua estrutura (Aderson et al., 1989). A soja também apresenta seletividade aos herbicidas deste grupo, como ao chlorimuron, que é desesterificado na Fase I do metabolismo secundário; por outro lado, o metsulfuron-methyl não é metabolizado devido à desesterificação incompleta deste herbicida (BROWN et al., 1990).

Outra enzima pode ser responsável pela detoxificação de herbicidas na Fase II do metabolismo é a glicosil-transferase. Estas realizam a conjugação de herbicidas com a glicose, por glicosilação de grupos funcionais específicos de moléculas lipofílicas (-OH, -COOH, -NH_2 e -SH) (YUAN et al., 2007), sendo o principal metabólito do bentazone em soja, o 6-hidroxibentazone, conjugado pela glicosil-transferase (LEAH et al., 1992). Ainda, há uma atribuição acerca da diferença de seletividade entre arroz e *Cyperus serotinusl*, devido a esta rota de conjugação metabólica (COBB; READE, 2011).

O sequestro de herbicidas é dado como a última fase do processo metabólico (**Fase III**), por meio da compartimentalização dos metabólitos dos herbicidas, da mesma maneira como os produtos do metabolismo secundário das plantas são armazenados (COBB; READE, 2011). Os autores citados anteriormente relacionam o sequestro à conjugação das moléculas, que primeiramente passaram por glicosilação, com o ácido malatiônico, que funciona como um marcador das moléculas que devem ser compartimentalizadas. Conjugações secundárias também podem ocorrer durante a Fase III, dando origem a compostos não fitotóxicos (HATZIOS, 1991), que posteriormente poderão ser sequestrados. Em alguns casos, há a associação de metabólitos do processo de desintoxicação, compartimentalizados em vacúolos, a compostos insolúveis da célula, como na parede celular (ligados a lignina, pectina, polissacarídeos e frações proteicas) (PILLMOOR et al., 1984; LANGEBARTELS; HARMS, 1985; COLE, 1994; EDWARDS et al., 2005). Não são totalmente inertes, considerados como reservatórios de atividade potencial no interior das plantas (COBB; READE, 2011).

As enzimas metabolizadoras de herbicidas, que conferem seletividade às

plantas cultivadas ou graus de tolerância e/ou resistência às plantas daninhas, podem ter sua ativação mais pronunciada com o uso de protetores ("safeners") aplicados em conjunto nas caldas de pulverização. No próximo tópico, serão abordados os fatores a respeito deste assunto.

4.2 Uso de safeners na seletividade de herbicidas

De acordo com Cobb e Reade (2011), "safeners" são substâncias químicas que, quando aplicadas anteriormente ou em conjunto com os herbicidas, aumentam a tolerância das culturas a um herbicida. Estas substâncias podem ser adicionadas à calda ou já estarem presentes na formulação comercial da molécula. Nandula (2017) relatou a eficácia dos "safeners" em culturas agrícolas de gramíneas como arroz, milho e sorgo aos herbicidas dos grupos iocarbamatos, cloroacetamidas, sulfonilureias e aroxifenoxipropionatos, quando aplicados em pré e pós-emergência. Vale lembrar que os "safeners" são produtos que, quando adicionados à calda com o herbicida, conferem a proteção aos cultivos, sendo um tipo de seletividade relacionada à formulação dos herbicidas.

Inicialmente, acreditava-se que a ação destas substâncias se dava pela sua semelhança estrutural com diversos herbicidas e que competiam pelos sítios de ação com os herbicidas. Contudo, a real ação destes compostos é o aumento dos processos de detoxificação de herbicidas, induzindo a ação da P450 oxigenases, da GST, de glucosiltransferases, do transporte vacuolar, da síntese de glutationa, glutationa peroxidase e assimilação de sulfato (COBB; READE, 2011). Duhoux et al. (2017) investigaram o efeito da aplicação de *safeners* (cloquintocet-mexyl e mefenpyr-diethyl) em associação com herbicidas inibidores da ALS (pyroxsulam e iodosulfuron + mesosulfuron), em plantas de *Lolium spp*., sensíveis a estes herbicidas. Quando associadas ao protetor cloquintocet-mexyl, as plantas apresentaram redução na sensibilidade de 44,4% e com o mefenpyr-diethyl, cerca de 11,1%. Os autores indicaram, estudando o gene responsável pela resistência não baseada no sítio de ação do produto, que a resposta obtida neste estudo está relacionada com a genética da planta que, responde ao efeito dos *safeners*. O uso destes genes é um caminho possível para a evolução na proteção de culturas geneticamente modifica-

das, para reduzir o risco de resistência em plantas daninhas.

Muitos dos protetores são comercializados já na formulação dos herbicidas, mas também de forma isolada. Dentre os *safeners*, o anídrido naftálico é um dos mais antigos e com maior disponibilidade de informação. Este pode ser utilizado em pré e pós-emergência, bem como no tratamento de sementes (KRAUSZ; KAPUSTA, 1992). Seu efeito está relacionado com o aumento da atividade da P450, culminando no aumento da hidroxilação dos herbicidas no interior das plantas, como no caso da aplicação em milho, aumentando a tolerância da cultura a tiocarbamatos (DAVIES, 2001; PARKER, 1983).

Assim, com o avanço dos estudos a respeito dos protetores, permitiu-se a comercialização de outros *safeners*, como isoxadifenethyl e cyprosulfamide, que aumentam a seletividade do milho, e também a isoxaflutole, foramsulfuron, thiencarbazone-methyl (ELMORE et al., 2015). Além de outros exemplos, como cloquintocet, fenchlorazole-ethyl e mefenpyr-diethyl, usados para aumentar a tolerância de culturas de cereais aos ariloxiphenoxipropionatos e sulfonilureias (DAVIES; CASELEY, 1999; HATZIOS; BURGOS, 2004). Outro exemplo, são as plantas de arroz, que são tolerantes ao clomazone somente com a aplicação dos protetores dietholate ou phorate (SANCHOTENE et al., 2010).

Em relação à ação no metabolismo secundário, de acordo com Moreland et al. (1989), os *safeners* aminobenzotriazole e tetcyclasis são exemplos de protetores que exercem efeito sobre a porção heme da P450, prevenindo a oxidação dos herbicidas. Por outro lado, os protetores também podem agir sinergicamente com outros compostos e auxiliar no aumento da fitotoxidade do herbicida à planta em que foram aplicados em conjunto. De acordo com os autores anteriormente citados, o produto thidiphane pode inibir a GTS e ser sinérgico à atrazine, podendo formar um conjugado fitotóxico com a glutationa, bem como inibir as monooxigenases ligadas a P450. Neste sentido, a seletividade de herbicidas, correlacionada com o metabolismo secundário das plantas, seja ele ativado pela planta, por protetores, seja complementadopor eles, condiciona a eficácia dos herbicidas para que controlem as plantas daninhas e não sejam tóxicos às culturas.

5 HORMESIS

O termo hormesis foi proposto por Southam e Ehrlich (1943) e é usado para definir o efeito benéfico a alguma característica de um organismo após este ser exposto a baixa dose de um composto. A hormesis, ou hormese, pode ocorrer em diversos organismos, sendo inicialmente descrita em fungos. Neste estudo, foi avaliado o efeito da exposição a soluções de extrato de casca de cedro, havendo um padrão de resposta bifásica: estímulo de crescimento em baixas doses e inibição do crescimento em doses altas.

Alguns pesquisadores afirmam que o efeito de hormesis se dá devido ao rompimento induzido da homeostase, havendo uma resposta adaptativa, enquanto outros autores indicam que tal efeito não é uma resposta evolutiva, e tal estimulação ocorre mediante um custo energético, podendo prejudicar alguma outra característica do organismo (CALABRESE, 1999; FORBES, 2000; CALABRESE; BALDWIN, 2002; PARSONS, 2003). Em plantas, o efeito hormético resulta em diferentes estímulos, em função do produto químico, da espécie e do modo como o produto age na morfologia ou no processo metabólico da planta. Como supracitado, a resposta hormética pode gerar um custo ao organismo, que pode influenciar no desenvolvimento de uma característica diferente. Esta compensação também pode ser revertida no decorrer do tempo, de modo que o crescimento inicial pode ser seguido por uma redução de crescimento.

Apesar de os estudos que avaliaram o efeito hormético em plantas terem início na década de 1950, até hoje os mecanismos fisiológicos que causam respostas de doses bifásicas em plantas não são completamente elucidados. Contudo, de acordo com alguns pesquisadores, o estímulo de crescimento de diferentes órgãos das plantas pode estar relacionado a uma tentativa de ajuste fisiológico em resposta ao estresse químico causado pelo produto.

5.1 Efeito hormético de herbicidas em plantas cultivadas

Os primeiros relatos de efeito hormético de herbicidas em plantas surgiram em 1950 e a partir daí, vários estudos têm avaliado o efeito de baixas doses

de herbicidas sob o estímulo de crescimento em plantas. Segundo Gazziero et al. (2006), o contato das plantas com baixas doses de herbicidas pode ocorrer devido a uma série de fatores, entre os quais: deriva no momento da aplicação devido a movimentos laterais e verticais da barra de aplicação; a aplicação acidental em pulverizações dirigidas; o contato das folhas tratadas com folhas das culturas; a redução do número de gotas que atingem a planta daninha devido à interceptação da parte superior das plantas, ou mesmo devido à absorção de baixas doses do solo. Uma vez que todos os herbicidas atuam sob vias ou processos cruciais para o desenvolvimento das plantas, baixas doses destes compostos podem ser utilizadas para modular o crescimento, o desenvolvimento ou a composição da planta.

Wiedman e Appleby (1972) estudaram o efeito de 16 herbicidas em plantas de aveia e pepino, encontrando efeito de estímulo de crescimento nas raízes, quando avaliados herbicidas inibidores do fotossistema II (PSII). Porém, não foram encontradas indicações de alterações na respiração, na fotossíntese, no conteúdo de proteínas, aminoácidos livres ou carboidratos solúveis.

Atualmente, a maioria dos estudos relacionados ao efeito de hormesis de herbicidas são realizados com glyphosate. Porém, este efeito benéfico, indicado por alguns autores (CEDERGREEN, 2008; BELZ et al., 2011), é definido como nocivo em plantas, nas mesmas concentrações que são esperados efeitos horméticos (CAKMAK et al., 2009).

A utilização de subdoses de glyphosate, por exemplo, é realizada em cana-de-açúcar visando ao acúmulo de sacarose e à inibição do crescimento (maturação). Tal efeito é uma prática comercial difundida e muito estudada. O herbicida sulfometuron-methyl também é comumente utilizado para este fim. Em plantas de café, Carvalho et al. (2013) avaliaram o efeito de glyphosate sobre o desenvolvimento de mudas jovens e mais velhas, e observaram que o estímulo, para esta espécie, ocorre em função da idade da planta, sendo maior em plantas mais velhas. Vários estudos foram conduzidos avaliando a hormesis em eucalipto, pínus, soja, milho e cevada. Porém, a maioria destes estudos avaliou o efeito hormético apenas no desenvolvimento inicial das plantas, sendo difícil estimar o efeito em produção para afirmar efetivamente o aumento de rendimento.

Silva (2014) avaliou o efeito hormético dos herbicidas glyphosate, amicarbazone, mesotrione, imazapic e carfentrazone em soja e observou que a aplicação

de glyphosate em baixas doses apresentou estímulo na produção de biomassa e na ETR (taxa de transporte de elétrons), incremento nos compostos da via do ácido chiquímico e aumento na concentração dos aminoácidos originados na via do chiquimato: fenilalanina, tirosina e triptofano, não encontrando efeito para os demais herbicidas. O efeito de baixas doses de glyphosate também foi avaliado no desenvolvimento e na produtividade de cultivares de feijão, porém não foi observado efeito de incremento de produtividade em feijoreiro (SILVA et al., 2012).
Em cevada, Cedergreen e Olesen (2010) observaram o estímulo da fotossíntese em plantas que foram expostas a 11 e 45 g e.a.ha^{-1} de glyphosate, efeito que persistiu até à colheita.

5.2 Hormesis em plantas daninhas

O efeito hormético de herbicidas é comprovado em várias culturas; entretanto, os dados referentes a este efeito em plantas daninhas são bastante limitados. Abbas et al. (2016) avaliaram o efeito de baixas concentrações de fenoxaprop-p-ethyl sobre o desenvolvimento e a produção de sementes de *Phalaris minor* (erva-cabecinha) e *Avena fatua* (aveia-brava). Foi observado um aumento inicial no crescimento, o qual se manteve até à maturação de ambas as espécies e houve também aumento na produção de sementes.

Para plantas daninhas resistentes, observou-se que a dose de herbicida necessária para causar o efeito de hormesis é aumentada na proporção em que a dose necessária para o controle aumenta. Estudos demonstram que a aplicação de subdoses de glyphosate pode estimular o crescimento e favorecer o desenvolvimento floral em populações resistentes de *Conyza spp*. (buva) (GOMES, 2014; CESCO, 2018). O estímulo de baixas doses de glyphosate também foi observado na antecipação do período de floração e de dispersão de sementes no biótipo resistente de *Conyza spp*. em relação ao suscetível (SHRESTHA et al., 2010).

O efeito de hormesis vem sendo bastante discutido nas áreas da toxicologia, buscando identificar de forma pontual a dose exata de estímulo de cada composto. Na área da agricultura, entre o desafio de produzir alimentos para toda a população e a disponibilidade de terras agricultáveis, a ênfase de produção dar-se-á

pela mudança no padrão de proteção de cultivos para o aprimoramento de culturas, processo que vem sendo facilitado por novas tecnologias e pela estimulação do crescimento. No entanto, as taxas de substâncias com efeito hormético ou a fitotoxidade são muito próximas, dificultando o uso destes produtos para o aumento de rendimento. Tal problema acentua-se devido ao fato de que as doses de pesticidas, condição ambiental, clima, tamanho e idade de plantas não são totalmente uniformes a campo. A compreensão dos mecanismos de hormesis pode facilitar o posicionamento, visando ao aumento de rendimento e à qualidade das culturas.

REFERÊNCIAS

ABBAS, T. et al. Low doses of fenoxaprop-p-ethyl cause hormesis in littleseed canarygrass and wild oat. **Planta daninha**, v. 527, p. 533-34, 2016.

ALONSO, D. G. et al. Seletividade de glyphosate isolado ou em misturas para soja RR em aplicações sequenciais. **Planta Daninha**, v. 31, p. 203-212, 2013.

AZANIA, C. A. M.; AZANIA, A. A. P. M. Seletividade de herbicidas. In: MONQUERO, P. A. (Org.). **Aspectos da Biologia e Manejo das Plantas Daninhas**. São Carlos: RIMA, 2014, p. 217-232.

BARRETT, M. The role of cytochrome P450 enzymes in herbicide metabolism. In: COBBS, A. H.; KIRKWOOD, C. (Eds.). **Herbicides and Their Mechanisms of Action**. Sheffield: Sheffield Academic, 2000. p. 25–37.

BELZ, R. G.; CEDERGREEN, N.; DUKE, S. O. Herbicide hormesis – can it be useful in crop production? **Weed Research**, v. 321, p. 332-51, 2011.

BIANCHI, A.; BIANCHI, G. Surface lipid composition of C3 and C4 plants. **Biochem. Syst**. Ecol. v. 18, p. 533-537, 1990.

BLANCO, F. M. G. et al. **Determining the Selectivity of Herbicides and Assessing**

Their Effect on Plant Roots-A Case Study with Indaziflam and Glyphosate Herbicides. London: InTech, 2015.

BROMILOW, R. H.; CHAMBERLAIN, K.; EVANS, A. A. Physicochemical aspects of phloem translocation of herbicides. **Weed Science**, v. 38, n. 3, p. 305–314, 1990.

BROWN, H. M. et al. Basis for soybean tolerance to thifensulfuron methyl. **Pest Biochem Physiol**. v. 37, p. 303-13, 1990.

BROWN, H. M. et al. Role of plant metabolism in crop selectivity of herbicides. In: FREHSE, H. (Ed.). **Pesticide Chemistry: Advances in International Research, Development and Legislation**. Weinheim: VCH, 1991. p. 257-66.

CAKMAK, I. et al. Glyphosate reduced seed and leaf concentrations of calcium, manganese, magnesium, and iron in non-glyphosate resistant soybean. **European Journal of Agronomy**, v. 114, p. 119-31, 2009.

CALABRESE, E. J. Evidence that hormesis represents an "overcompensation" response to a disruption in homeostasis. **Ecotoxicology and Environmental Safety**. v. 135, p. 137-42, 1999.

CALABRESE, E. J.; BALDWIN, L. A. Defining hormesis. **Human & experimental toxicology**, v. 91, p. 97-21, 2002.

CARVALHO, S. J. P. et al. Herbicide selectivity by differential metabolism: considerations for reducing crop damages. **Scientia Agricola**, v. 66, p. 136-42, 2009.

CARVALHO, L. B.; ALVES, P. L. C. A.; DUKE, S. O. Hormesis with glyphosate depends on coffee growth stage. In ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS **Anais**... Academia Brasileira de Ciências. 2013. p. 822-85.

CEDERGREEN, N. Is the growth stimulation by low doses of glyphosate sustained over time? **Environmental Pollution,** v.1099, p. 1104-156, 2008.

CEDERGREEN, N.; OLESEN, C. F. Can glyphosate stimulate photosynthesis?. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 140, p. 148-96, 2010.

CESCO, V. J. S. **Hormesis de glyphosate no desenvolvimento vegetativo e reprodutivo de biótipos de *Conyza spp***. 2018. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2018.

CHO, H. Y.; KONG, K. H. Molecular cloning, expression, and characterization of a phitype glutathione S-transferase from *Oryza sativa*. **Pest Biochem Physiol**, v. 83, p. 29–36, 2005.

COBB, A. H.; READE, J. P. H. Herbicide selectivity and metabolism. In: COBB, A. H.; READE, J. P. H. **Herbicides and Plant Physiology**. 2. ed. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2011. p. 70-86.

COLE, D. J. Detoxification and activation of agrochemicals in plants. **Pesticide Science**, v. 42, p. 209-22, 1994.

CUDNEY, D. W. **Why herbicides are selective**. Symposium Proceedings of the California Exotic Pest Plant Council. 1996. Disponível em: <http://www. cal-ipc. org/symposia/archive/1996_proceedings>. Acesso em: mar 2019.

DAVIES, J.; CASELEY, J. C. Herbicide safeners: a review. **J Pestic Sci**., v. 55, p. 1043-58, 1999.

DAVIES, J. Herbicide safeners-commercial products and tools for agrochemical research. **Pesticide Outlook**, v. 12, p. 10-5, 2001.

DENG, F.; HATZIOS, K. K. Characterization of cytochrome P450-mediated bensulfuronmethyl O-demethylation in rice. **Pest Biochem Physiol**, v. 74, p. 102–15, 2003.

DUHOUX, A. et al. Herbicide safeners decrease sensitivity to herbicides inhibiting acetolactate-synthase and likely activate non-target-site-based resistance pathways

in the major grass weed *Lolium* sp.(rye-grass). **Front Plant Sci**, v. 8, p. 1-14, 2017.

EDWARDS, R.; DIXON, D. P. The role of glutathione transferases in herbicide metabolism. In: COBB, A. H.; KIRKWOOD, R. C. (Eds.). **Herbicides and their Mechanisms of Action**. Sheffi eld: Sheffi eld Academic Press, 2000.

EDWARDS, R. et al. Chemical manipulation of antioxidant defenses in plants. **Adv Bot Res**, v. 42, p. 1-32, 2005.

ELMORE, M. T. et al. Influence of herbicide safeners on creeping bentgrass (*Agrostis stolonifera*) tolerance to herbicides. **Weed Technology**, v. 29, p. 550-60, 2015.

FAHL, J. L.; CARELLI, M. L. Eficiência do nicosulfuron no controle de capim massambará na cultura do milho. **Planta Daninha**, v. 15, p. 46-52, 1997.

FREAR, D. S.; SWANSON, H. R. Biosynthesis of S-(4-ethylamino-6-isopropylamino--2-striazino) glutathione: partial purification and properties of a glutathione S-transferase from corn. **Phytochemistry**, v. 9, p. 2123–2132, 1970.

GAUL, S. et al. Tridiphane-metribuzin interactions in soybeans (maple amber) and tomatoes (vision and springset). **WSSA Abstract**, v. 207, p. 75, 1985.

GAZZIERO, D. L. P. et al. Glyphosate deposition for weed control in transgenic soybean. **Planta daninha**, v. 173, p. 181-24, 2006.

GOMES, G. L. G. C. **Caracterização bioquímica e morfofisiológica de populações de Buva *(Conyza spp.)* resistentes ao glyphosate**. 2014. 120 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2014.

HATZIOS, K. K. Biotransformations of herbicides in higher plants. In: GROVER, R.; CESSNA, A. J. (Eds.) **Environmental Chemistry of Herbicides**. Boca Raton: CRC Press, 1991. p.141-185.

HATZIOS, K. K.; BURGOS, N. Metabolism-based herbicide resistance: regulation by safeners. **Weed Science**, v. 52, p. 454-67, 2004.

JABLONKAI, I. Herbicide metabolism in weeds - selectivity and herbicide resistance. In: PRICE, A.; KELTON, J.; SARUNAITE, L. **Herbicides, Physiology of Action, and Safety**. Croatia: InTech, 2015. p. 223-251.

KRAUSZ, R. F.; KAPUSTA, G. Safening of corn (*Zea mays*) from clomazone injury with naphthalic anhydride. **Weed Technology**, v. 6, 1992.

LADNER, D. W. Structure-Activity Relationships among the Imidazolinone Herbicides. **Pesticide Science**, v. 29, p. 317–333, 1990.

LANGEBARTELS, C.; HARMS, H. Analysis for nonextractable (bound) residues of pentachlorophenol in plant cells using a cell wall fractionation procedure. **Ecotox Environ Safe**, v. 10, p. 268-79, 1985.

LEAH, J. M.; WORRALL, T. L.; COBB, A. H. Isolation and characterization of 2 glucosyltransferases from *Glycine max* associated with bentazone metabolism. **J Pestic Sci**. v. 34, p. 81–7, 1992.

LEFSRUD, C.; HALL, J. C. Basis for sensitivity differences among crabgrass, oat, and wheat to fenoxaprop-ethyl. **Pest Biochem Physiol**, v. 34, p. 218-27, 1989.

MCCULLOUGH, P. E. et al. Dithiopyr Behavior in Smooth Crabgrass (*Digitaria ischaemum*) as Influenced by Growth Stage and Temperature. **Weed Science**, v. 62, p. 11-21, 2014.

MONQUERO, P. A.; HIRATA, A. C. S. Comportamento de Herbicidas nas Plantas. In: MONQUERO, P. A. (Ed.). **Aspectos da Biologia e Manejo das Plantas Daninhas**. São Carlos: Rima, 2014. p.145-165.

MORELAND, D. E.; NOVITZKY, W. P.; LEVI, P. E. Selective inhibition of cytochrome

p450 isozymes by the herbicide synergist tridiphane. **Pest Biochem Physiol**, v. 35, p. 42-9, 1989.

NANDULA, V.K. Recent Advances in Deciphering Metabolic Herbicide Resistance Mechanisms. In: JUGULAM, M. (Ed.) **Biology, Physiology and Molecular Biology of Weeds**. Boca Raton: CRC Press, 2017. p. 154-165.

NEGRISOLI, E. et al. Selectivity of pre-emergence herbicides to sugarcane treated with nematicides. **Planta Daninha**, v. 22, p. 567-75, 2004.

OLIVEIRA JR, R. S. Seletividade de herbicidas para culturas e plantas daninhas. In: OLIVEIRA JR, R. S.; CONSTANTINI, J. **Plantas Daninhas e seu Manejo**. Guaíba: Agropecuária, 2001. p. 291-313.

OLIVEIRA JR, R. S.; INOUE, M. H. Seletividade de herbicidas para culturas e plantas daninhas. In: OLIVEIRA JR, R. S.; CONSTANTIN, J.; INOUE, M. H. **Biologia e manejo de plantas daninhas**. Curitiba: Omnipax, 2011. p. 243.

OWEN, W. J. Herbicide metabolism as a basis for selectivity. In: KIRKWOOD, R. C. (Ed.). **Target Sites for Herbicide Action**. New York: Springer, 1991. p. 285-341.

PARKER, C. Herbicide antidotes - a review. **Pesticide Science**. v. 14, p. 40-8, 1983.

PARSONS, P. A. Metabolic efficiency in response to environmental agents predicts hormesis and invalidates the linear No-Threshold Premise: Ionizing radiation as a case study. **Critical Reviews in Toxicology**, v. 443, p. 450-33, 2003.

PILLMOOR, J. B.; GAUNT, J. K.; ROBERTS, T. R. Examination of bound (non-extractable) residues of MCPA and flamprop in wheat straw. **Pesticide Science**, v. 15, p. 375-81, 1984.

PLINE, W. A. et al. Absorption and translocation of glyphosate in glyphosate-resistant cotton as influenced by application method and growth stage. **Weed Science**,

v. 49, p. 460–467, 2001.

POLGE, N. D.; BARRETT, M. Characterization of cytochrome P450-mediated chlorimuron ethyl hydroxylation in maize microsomes. **Pest Biochem Physiol**, v. 53, p. 193–204, 1995.

PRICE, C. E. A review of the factors influencing the penetration of pesticides through plant leaves. In: CUTLER, D. F.; ALVIN, K. L.; PRICE, C. E. **The Plant Cuticle**. New York: Academic Press, 1982. p. 237-252.

RITTER, R. L.; COBLE, H. D. Penetration, translocation, and metabolism of acifluorfen in soybean (*Glycine max*), common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia)*, and common cocklebur (*Xanthium pensylvanicum*). **Weed Science,** v. 29, p. 474-80, 1981.

SANCHOTENE, D. M. et al. Phorate e dietholate protegem o arroz da fitotoxicidade do clomazone em doses elevadas. **Planta Daninha**, v. 28, p. 909-12, 2010.

SHIMABUKURO, R. H.; SWANSON, H. R.; WALSH, W. C. Glutathione conjugation: Atrazine detoxication mechanism in corn. **Plant Physiology**, v. 46, p. 103–7, 1970.

SHRESTHA, A. et al. Growth, phenology, and intraspecific competition between glyphosate-resistant and glyphosate-susceptible horseweeds (*Conyza canadensis*) in the San Joaquin Valley of California. **Weed Science**, v. 147, p. 153-58, 2010.

SILVA, F. M. L. **Hormesis de herbicidas em soja.2014**. 85 f. Tese (Doutorado). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2014.

SILVA, J. C. et al. Efeito hormese de glyphosate em feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, p. 295-302, 2012.

SIMINSZKY, B. et al. Expression of a soybean cytochrome P450 monooxygenase cDNA in yeast and tobacco enhances the metabolism of phenylurea herbicides. **Proc Natl Acad Sci**., v. 96, p. 1750–1755, 1999.

SOUTHAM, C. M.; EHRLICH, J. Effects of extracts of western red-cedar heartwood on certain wood-decaying fungi in culture. **Phytopathology**, v. 33, p. 517–524, 1943.

STEPHENSON, G. R.; EZRA, G. Chemical approaches for improving herbicide selectivity and crop tolerance. **Weed Science**, v. 35, p. 24-27, 1987.

SULLIVAN, J. O.; BOUW, W. J. Sensitivity of processing sweet corn (*Zea mays*) cultivars to nicosulfuron/rimsulfuron. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 41, p. 151-154, 1997.

SUTTON, R. F. Selectivity of herbicides. **The Forestry Chronicle**, v. 43, p. 265-268, 1967.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 5.ed. Porto Alegre: Artmed, 2013.

TENBROOK, P. L.; TJEERDEMA, R. S. Biotransformation of clomazone in rice (Oryza sativa) and early watergrass (*Echinochloa oryzoides*). **Pest Biochem Physiol**, v. 85, p. 38-45, 2006.

VALENTI, H. M.; PITTY, A.; OWEN, M. D. K. Effect of environment on giant foxtail (*Setaria faberi*) leaf was and fluazifop-p absorption. **Weed Science**, v. 54, p. 607-614, 2006.

VASSIOS, J. D.; NISSEN, S. J.; BRUNK, G. R. Imazamox absorption, desorption, and metabolism by Eurasian watermilfoil. **J Aquat Plant Manage**, v. 49, 2011.

WESELOH, J. W. The role of tridiphane as an overlay treatment following an application of a preemergence herbicide on corn. **Weed Control Conf**, v. 38, 120 p., 1983.

WIEDMAN, S. J.; APPLEBY, A. P. Plant growth stimulation by sublethal concentrations of herbicides. **Weed research**, v. 65, p. 74-12, 1972.

XIE, H. S.; HSIAO, A. I.; QUICK, W. A. Effect of shading on activity of imazamethabenz and fenoxaprop in wild oat (*Avena fatua*).**Weed Science**, v. 42, p.66-69, 1994.

XIE, H. S.; HSIAO, A. I.; QUICK, W. A. Influence of Temperature and Light Intensity on Absorption, Translocation, and Phytotoxicity of Fenoxaprop-ethyl and Imazamethabenz-methyl in *Avena fátua*. **Plant Growth Regulation**, v. 15, p. 57-62, 1996.

YASUOR, H. et al. Differential oxidative metabolism and 5-ketoclomazone accumulation are involved in *Echinochloa phyllopogon* resistance to clomazone. **Plant Physiology**, v. 153, p. 319–26, 2010.

YUAN, J. S.; TRANEL, P. J.; STEWART JR, C. N. Non-target-site herbicide resistance: a family business. **Trends Plant Sci**, v. 12, p. 6-13, 2007.

ZIMMERLIN, A.; DURST, F. Aryl hydroxylation of the herbicide diclofop by a wheat cytochrome P-450 monooxygenase. **Plant Physiology**, v. 100, p. 874–81, 1992.

CAPÍTULO 10

RESISTÊNCIA DE PLANTAS DANINHAS AOS HERBICIDAS

Catarine Markus[1]
Arthur Arrobas Martins Barroso[2]
Giliardi Dalazen[3]
Eduardo Roncatto[4]
Aldo Merotto Júnior[1]

[1]Professor(a) Dr(a) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), [2]Professor Dr. Universidade Federal do Paraná (UFPR), [3]Professor Dr. Universidade Estadual de Londrina (UEL), [4]Mestre em Produção Vegetal Universidade Federal do Paraná (UFPR).

1 INTRODUÇÃO

A resistência de plantas daninhas a herbicidas é, sem dúvida, um dos maiores desafios da agricultura atual. Ela é definida como a capacidade de uma população sobreviver e reproduzir-se, mesmo após receber a aplicação de dose de herbicida que normalmente seria letal (dose de bula) a essa espécie (WSSA, 1998). Assim, a resistência trata-se de uma característica adquirida e herdável, apresentada por biótipos de determinada espécie. Uma das principais implicações da resistência de plantas daninhas a herbicidas é a elevação dos custos de produção, podendo levar, em alguns casos, ao aumento de até 290% nos custos de controle (EMBRAPA, 2017). Ainda, o controle ineficiente de plantas daninhas resistentes pode fazer com que as culturas sofram com os processos competitivos de convivência com essas plantas não controladas, ocasionando perdas de produtividade. O efeito da resistência no custo de produção, considerando o incremento do gasto de controle e das perdas de produtividade, é estimado na cultura de soja em R$ 9 bilhões ao ano (EMBRAPA, 2017). Na cultura do arroz irrigado, que perfaz aproximadamente 1,2 milhão de ha, a perda total causada pela resistência a herbicidas é estimada em R$ 0,5 bilhão ao ano (A. Merotto, dados não publicados).

A resistência de plantas daninhas a herbicidas pode ocorrer para herbicidas de determinado grupo químico, dentro de um mesmo mecanismo de ação (resistência simples), a dois ou mais grupos químicos, dentro de um mecanismo de ação (resistência cruzada) ou a dois ou mais mecanismos de ação (resistência múltipla). Atualmente, existem 512 casos únicos de plantas daninhas resistentes a herbicidas no mundo, que correspondem a 262 espécies de plantas daninhas, com casos de resistência notificados para 23 dos 26 mecanismos de ação de herbicidas registrados. No Brasil, no início de 2020, estão registrados 51 casos, envolvendo 29 espécies distintas, resistentes a oito mecanismos de ação diferentes (Figura 1). Ressalta-se que, no Brasil, existem populações de plantas com resistência múltipla, como, por exemplo os biótipos de buva (*Conyza sumatrensis*), que apresentam resistência a cinco mecanismos de ação diferentes (Figura 2). Nos últimos dez anos, o número de casos envolvendo a resistência múltipla a herbicidas saltou de dois para 17 casos (HEAP, 2019).

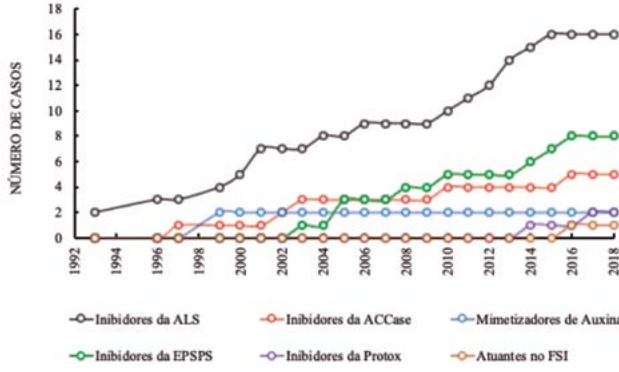


Figura 1. Evolução do número de casos de resistência simples a herbicidas de diferentes mecanismos de ação no Brasil.
Fonte: Adaptado de HEAP (2019), e atualizado em dezembro de 2019.

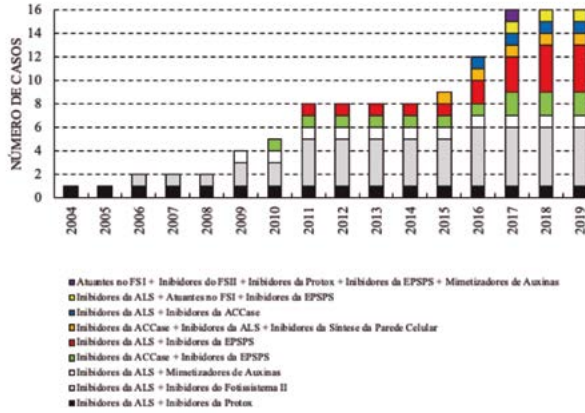


Figura 2. Evolução do número de casos de resistência múltipla a herbicidas de diferentes mecanismos de ação no Brasil.
Fonte: Adaptado de HEAP (2019), e atualizado em dezembro de 2019.

É importante salientar que a resistência de plantas daninhas não é gerada pela aplicação do herbicida. Os herbicidas apenas selecionam indivíduos que sofre-

ram mutação durante a duplicação do material genético (DNA), processo que ocorre naturalmente na interfase, antes da divisão celular. Estima-se que o DNA nuclear seja replicado com taxa de mutação de 10^{-6}. Assim, mesmo sem a aplicação do herbicida, essas mutações ocorrem de forma aleatória em todos os organismos. Quando alguma dessas mutações ocorre em um gene que esteja envolvido na ação de determinado herbicida, o herbicida passa a ser ineficiente nessas plantas, caracterizando o processo de resistência. Por ser uma característica herdável, se esse mesmo herbicida for utilizado de forma repetida, e for o único método de controle, a mutação será dispersa, e a resistência aumentará sua frequência na área. Assim, os mecanismos de resistência de plantas daninhas aos herbicidas são resultantes da ocorrência de mutações que causam redução da suscetibilidade das plantas a esses compostos.

Existem dois mecanismos primários de resistência: a resistência relacionada ao local de ação do herbicida (RELA) e a resistência não relacionada ao local de ação do herbicida (N-RELA) (YUAN et al., 2007; YU; POWLES, 2014). A seguir, serão apresentados e discutidos esses mecanismos e como eles afetam a eficácia de controle do herbicida.

2 MECANISMOS DE RESISTÊNCIA A HERBICIDAS

Embora os mecanismos de resistência presentes em plantas daninhas possam ser divididos entre RELA e N-RELA, determinadas espécies podem apresentar resistência devido ao acúmulo desses mecanismos. O conhecimento dos mecanismos de resistência contribui para a compreensão da necessidade de prevenção do problema, bem como para a orientação do manejo da resistência de plantas daninhas em áreas onde o problema já ocorre.

2.1 Relacionados ao Local de Ação (RELA)

Os mecanismos relacionados ao local de ação incluem alterações da enzima-alvo, causadas por mutações ou deleções de aminoácidos, e pela superpro-

dução da enzima-alvo, causada pela amplificação ou superexpressão do gene que a codifica. Esses mecanismos estão comumente presentes em plantas, conferindo resistência a herbicidas inibidores de Acetil-CoA carboxilase (ACCase), inibidores de acetolactato sintase (ALS), inibidores do Fotossistema II (FSII), inibidores da polimerização de tubulina, inibidores da protoporfirinogênio oxidase (PROTOX) e inibidores da 5-enolpiruvilchiquimato-3-fosfato sintase (EPSPs).

2.1.1 Alteração da enzima-alvo devido às modificações de bases nitrogenadas

A resistência decorrente de alterações no sítio de ação dos herbicidas é ocasionada por mudanças na estrutura 3D da enzima-alvo, que podem modificar a estabilidade de ligação do herbicida com a enzima. Essas alterações são ocasionadas por substituição/deleção de nucleotídeos em posições específicas e pontuais na sequência gênica que codifica para a enzima-alvo do herbicida. Essa mutação no gene pode levar à alteração do códon e do aminoácido por ele codificado na enzima. Até o momento, foram encontradas como causadoras desse tipo de resistência mutações simples, duplas e triplas, além da deleção de um códon inteiro. Como regra, diversas mudanças podem conferir resistência aos herbicidas que, reduzindo sua afinidade com a enzima, deixam de apresentar efeito de controle da planta daninha. O nível da resistência irá depender especificamente de cada alteração (local da mutação), de cada espécie, do número de alelos envolvidos e da dose do herbicida utilizado (MOSS, 2017). O nível de resistência, também chamado de "Fator de Resistência" (FR), possibilita analisar a intensidade da resistência. Para sua obtenção, deve-se determinar a dose que promove 50% de controle (C50 ou DL50) ou de redução de massa (GR50) nos indivíduos resistentes (R) e dividir pelo C50 ou GR50 dos biótipos suscetíveis (S), tendo: FR= R/S. Assim, o FR expressa o número de vezes em que a dose necessária para controlar 50% do biótipo resistente é superior à dose que controla 50% do biótipo suscetível (HALL et al., 1998).

A resistência aos herbicidas inibidores do FSII decorre comumente de uma mutação que acontece no gene *psbA* (gene codificador da proteína D1, onde se ligam os herbicidas), que altera um aminoácido Serina para uma Glicina na posição 264 do gene (Ser-264-Gly). Essa mutação permite a ligação da plastoquinona (PQ)

com a proteína, porém impede a ligação do herbicida. Por outro lado, essa mutação afeta também a ligação da PQ, alterando a fotossíntese das plantas resistentes, que passam a apresentar menor desenvolvimento (GRONWALD, 1994). Outras mutações são responsáveis por causar resistência a outros grupos de herbicidas com o mesmo mecanismo de ação. A substituição Serina-264-Treonina confere resistência às triazinas (ex.: atrazina) e ureias (ex.: linuron). As substituições Leucina-218-Valina e Alanina-251-Treonina conferem resistência às triazinonas (ex.: metribuzin). Sendo assim, conhecer especificamente as mutações presentes em cada espécie é essencial para a recomendação do herbicida a ser utilizado (POWLES; YU, 2010; MCMURRAY et al., 2019).

Para os herbicidas inibidores da EPSPS, também são poucas as mutações conhecidas na enzim-alvo que geram resistência em plantas daninhas. Isso decorre do fato de que o sítio ativo da enzima EPSPS é altamente conservado. Além disso, as demais mutações possíveis seriam letais à planta, uma vez que, além do glyphosate, os substratos utilizados pela enzima EPSPS também não se ligariam ao seu sítio catalítico. A resistência ao glyphosate, causada por mecanismos RELA, foi primeiramente identificada em biótipos de *Eleusine indica* na Malásia, em uma substituição pontual na posição 106 do gene *EPSPS*, substituindo uma Prolina por uma Serina (Pro-106-Ser). Essa mesma mutação foi encontrada recentemente em plantas de *E. indica* resistentes ao glyphosate no Brasil (TAKANO et al., 2019). As substituições do aminoácido Prolina na posição 106 por Treonina e Leucina também já foram identificadas como a causa da resistência ao glyphosate em *E. indica*. Em outras espécies, como *Lolium rigidum*, *Lolium multiflorum*, *Amaranthus tuberculatus*, *Echinochloa colona* e *Conyza canadensis*, substituições de uma Prolina na posição 106 por outros aminoácidos também geram resistência ao glyphosate (HEAP, 2019). Além de Prolina 106, outras substituições também podem afetar a sensibilidade das plantas aos herbicidas, como a de Treonina por Serina na posição 102 em *Tridax procumbens* (LI et al., 2018). Em todos esses casos, as mutações não conferem elevados níveis de resistência às plantas quando ocorrem de forma isolada, com FR menor que 10. Entretanto, a ocorrência de mutação dupla (TIPS) Trh-102-Ile e Pro-106-Ser no gene *EPSPS* de *E. indica* resulta em alto nível de resistência, com FR 180 vezes maior quando comparado à população suscetível, e 32 vezes maior quando comparado à população com mutação simples (Pro-106-Ser) (BARROSO, dados não publicados).

Cabe salientar que, em alguns casos, as mutações na enzima-alvo podem afetar o desenvolvimento das plantas, mesmo na ausência do herbicida, o que é chamado de custo adaptativo da resistência, ou *"fitness"* (BAERSON et al., 2002; ZANGENEH et al., 2018). Por exemplo, a presença da mutação dupla no gene *EPSPS* penaliza o crescimento das plantas resistentes, reduzindo seu desenvolvimento quando comparadas às plantas silvestres (suscetíveis) e às plantas com uma mutação pontual (Pro-106) (Figura 3). As plantas com mutação dupla (Trh-102-Ile e Pro-106-Ser) são oriundas de populações com a presença da mutação simples Pro-106-Ser. Acredita-se que a origem direta de uma mutação na posição Trh-102 resultaria em um impacto elevado no desenvolvimento de plantas, impedindo sua sobrevivência (YU et al., 2015). A mesma mutação dupla também já foi relatada em *Bidens pilosa* (ALCÁNTARA DE LA CRUZ et al., 2016).

Figura 3. Plantas de Eleusine indica aos 14 dias após a emergência na ausência de herbicidas. A planta da esquerda apresenta mutação dupla (Trh-102-Ile e Pro-106-Ser) no gene EPSPS. A planta do meio apresenta a mutação simples Pro-106-Ser, e a planta da direita não apresenta mutações no gene EPSPS.
Fonte: os autores.

Por fim, outra mutação recém-relatada é resultado de uma modificação tripla no gene *EPSPS* em plantas de *Amaranthus hybridus*. As mutações (TAP-IVS)

ocorrem nas posições Thr-102-Ile, Ala-103-Val e Pro-106-Ser. Nesse caso, os autores sugerem que as penalidades de desenvolvimento de plantas são reduzidas se comparadas às plantas TIPS. Tal fato decorre de que, mesmo reduzindo a afinidade da molécula de glyphosate com sítio catalítico da enzima EPSPS, não há redução da afinidade da enzima pelo substrato fosfoenolpiruvato (PEP) (PEROTTI et al., 2019). Outro estudo em *A. hybridus* identificou estas mesmas mutações resultando em FR de 100,6 (PALMA-BAUTISTA et al., 2019).

Diferentemente dos mecanismos de ação supracitados, a enzima ALS apresenta várias modificações que levam à resistência. Desde 1994, diversas mutações no gene *ALS* vêm sendo relatadas como causa da resistência a esses herbicidas. Até 2019, já foram identificadas 29 possíveis mutações que promovem resistência aos inibidores da ALS em 160 espécies. As posições do gene ALS onde foram encontradas mutações são nas posições 122; 197; 205; 376; 377; 574; 653 e 654. As mutações mais comumente observadas, presentes em mais de 20 casos, estão relacionadas às mutações nas posições 574 e 197 do gene *ALS*, sendo as mais comuns as substituições Trp-574-Leu e Pro-197-Ser. Nesse mecanismo de ação, a mesma espécie pode apresentar diferentes mutações. Plantas de *Amaranthus palmeri*, por exemplo, podem apresentar mutações na posição 574 ou 653, e plantas de *Kochia scoparia*, mutações nas posições 197; 376 ou 574 (HEAP, 2019).

A ocorrência de uma mutação no gene *ALS* nem sempre confere resistência a todos os herbicidas que inibem essa enzima. Ou seja, mutações específicas conferem padrões de resistência específicos. Por exemplo, a substituição Pro-197-Ser confere resistência às sulfonilureias (ex.: chlorimuron-ethyl), e a modificação Trp--574-Leu, resistência às sulfonilureias e imidazolinonas (ex.: imazapic) (POWLES; YU, 2010). A lista completa das mutações no gene *ALS* já identificadas em plantas daninhas com o padrão da resistência para essas mutações é encontrada em http:// www.weedscience.org/mutations/MutationDisplayAll.aspx.

Para os herbicidas inibidores da ACCase, até o momento, foram identificadas 8 substituições no gene *ACCase* que levam à resistência (POWLES; YU, 2010). A primeira mutação identificada foi a substituição de uma Leucina na posição 1.781 por uma Isoleucina (Leu-1781-Ile). Essa é a mutação mais encontrada no gene *ACCase* até o presente momento, incluindo as plantas como *Avena fatua e L. multiflorum*. Outras mutações incluem as substituições nas posições 1.999; 2.027; 2.041; 2.078;

2.088 e 2.096 do gene *ACCase*.

Assim como para os inibidores da ALS, o padrão de resistência varia de acordo com as substituições. Dessa forma, dependendo da mutação, a planta pode ser resistente aos ariloxifenoxipropionatos (fops), ciclohexanodionas (dims), fenilpirazolinas (dens), ou aos três grupos químicos. Dentre as previamente citadas, as substituições nas posições 1.781, 2.078 e 2.088 são as mais preocupantes, uma vez que causam resistência em alto nível aos herbicidas pertencentes aos três grupos químicos que inibem a enzima ACCase (POWLES; YU, 2010). Por outro lado, algumas mutações geram resistência a apenas um grupo químico, como as mutações Trp-2027-Cys e Ile-20410-Asn, que causam resistência apenas aos "fops", e a mutação Trp-1999-Cys, a apenas o herbicida fenoxaprop (LIU et al., 2007). Dessa forma, a identificação das mutações que causam resistência aos inibidores da ACCase é fundamental, uma vez que esses herbicidas são amplamente utilizados no manejo de poáceas, como: *Digitaria insularis*, *E. indica e L. multiflorum*. Caso uma das mutações, que gera resistência cruzada a "fops" e "dims", seja selecionada e dispersada nessas espécies, as opções de herbicidas pós-emergentes ficam extremamente limitadas.

Além disso, a ocorrência da resistência em função da mutação depende da espécie de planta daninha. Por exemplo, a substituição Ile-2041-Asn já foi identificada em *Phalaris paradoxa* (HOCHBERG et al., 2009) e *Alopecurus myosuroides* (DÉLYE et al., 2008), porém confere resistência a cicloxydim apenas na primeira espécie. Outro fator envolvido na resistência e no nível em que ela se expressa é o grau de homozigozidade do alelo que confere resistência. Em população australiana de *L. rigidum*, plantas contendo a mutação Ile-1.781-Leu foram resistentes ao clethodim apenas quando o alelo era homozigoto (YU et al., 2007).

Para os herbicidas atuantes na polimerização de Tubulina, foram encontradas mutações na sequência do gene *α-tubulina* em três espécies: *E. indica* (Thr-239-Ile) (ANTHONY et al., 1998), *Setaria viridis* (Leu-136-Phe e Thr-239-Ile) (DÉLYE et al., 2004) e L. rigidum (Val-202-Phe e Thr-239-Ile) (CHEN et al., 2018). Nesses casos, o herbicida não consegue ligar-se à α-tubulina e impedir a formação de polímeros de α-tubulina e β-tubulina. A herança dessa resistência é recessiva e controlada por um simples gene nuclear. Assim, apenas indivíduos homozigotos recessivos sobrevivem na dose recomendada do herbicida. Essa característica da resistência

diminui a importância e o número de casos relatados até hoje, sendo mais importante nos Estados Unidos, Canadá e Austrália (HEAP, 2019).

A resistência do tipo RELA, verificada para herbicidas inibidores da PROTOX, curiosamente, já foi relacionada à deleção de três pares de base (um códon) no gene *PPX2L* (que codifica a enzima PROTOX), o que ocasionou a deleção do aminoácido Glicina na posição 210 da enzima. Essa deleção já foi relatada para *A. palmeri* e *A. tuberculatus*. Recentemente, outras mutações na posição 98 do gene PPX2L (Arg-98-Gly e Arg-98-Met) foram identificadas em *A. palmeri* (GIACOMINI et al., 2017), assim como previamente também descrita para *Ambrosia artmisiifolia* (Arg-98-Leu) (ROUSONELOS et al., 2012). Com relação à deleção de aminoácido na enzima PROTOX, verificou-se que essa modificação aumenta o volume do sítio catalítico da enzima, readaptando estruturalmente o domínio de ligação do substrato. A deleção do códon confere elevados níveis de resistência às plantas, porém, nenhum efeito na ligação da enzima com seu substrato. Ou seja, as plantas resistentes não apresentam custo adaptativo devido à mutação. Ressalta-se que essa deleção é muito mais rara do que uma substituição simples de aminoácidos (~10^{-18} x ~10^{-9}) (GIACOMINI et al., 2017).

2.1.2 Superprodução da enzima-alvo

A resistência RELA também pode ser ocasionada pela superprodução da enzima-alvo, através do aumento do número de cópias do gene que a codifica, ou através de mudanças da região promotora desses genes, o que acarreta maior transcrição gênica e, assim, maior quantidade de enzimas (GAINES et al., 2010; POWLES; YU, 2010). Desta forma, o herbicida mantém sua afinidade de ligação com a enzima; entretanto, a quantidade do herbicida não é suficiente para inibir todas as enzimas produzidas, possibilitando à planta a sobrevivência e o desenvolvimento.

O aumento do número de cópias do gene foi relatado pela primeira vez por Gaines et al. (2010), sendo encontrado em biótipos resistentes de *A. palmeri*, que apresentaram até 160 vezes mais cópias do gene EPSPS em comparação ao biótipo suscetível. Esse mecanismo de resistência ao glyphosate também foi observado em biótipos de *A. tuberculatus*, *A. spinosus* (CHATAN et al., 2015), *E. indica* (CHEN et al.,

2015), *L. perene* (SALAS et al., 2012), *Bromus diandrus* (MALONE et al., 2016), *Chloris truncata* (NGO et al., 2017) e *K. scoparia* (WIERSMA et al., 2015). Mais recentemente, encontrou-se que a superprodução enzimática também ocorre como mecanismo de resistência para herbicidas inibidores da ACCase, tornando plantas de *Digitaria sanguinalis* resistentes aos herbicidas clethodim, haloxyfop, sethoxydim, fluazifop e fenoxaprop (LAFOREST et al., 2017). As causas que levam à superexpressão e amplificação dos genes ainda não estão completamente elucidadas. Antes atribuída a transposons (MITEs, *miniature inverted-repeat transposable elements*) ou pela modificação de promotores específicos de cada gene, considera-se atualmente que a causa mais próxima se encontra pela replicação de DNA circular exrtracromossômico (eccDNAs) (KOO et al., 2018; ZHANG et al., 2018).

O aumento de expressão do gene *ACCase* foi reportado em *Sorghum halepense* nos EUA (BRADLEY et al., 2001), e em *Leptochloa chinensis* na Tailândia (PORNPROM et al., 2006), sendo que, em ambos os casos, a atividade específica da enzima estava três vezes maior quando comparada ao biótipo suscetível. Uma vez em maior quantidade, ela é capaz de catalisar as reações de síntese de ácidos graxos na presença da mesma quantidade de um inibidor, que não bloqueia a ação fisiológica total da enzima em níveis incompatíveis com o metabolismo celular.

Na maioria dos casos, esse mecanismo de resistência não está associado a penalidades adaptativas, como observado em *A. palmeri*. A superexpressão gênica chegou a causar benefícios no desenvolvimento das plantas, elevando a fecundidade e a produção de sementes de plantas resistentes de *Arabidopsis thaliana* (VILA-AIUB et al., 2014; MARTIN et al., 2017; BERES et al., 2018). Em casos da ausência de penalidade, a elevação da expressão do gene EPSPS parece estar ligada à superexpressão de outros genes importantes no metabolismo vegetal. Outra explicação relaciona-se à possibilidade de a planta resistente apresentar a habilidade de recuperação dos aminoácidos produzidos em excesso, especialmente o triptofano (HILDEBRANDT et al., 2015; CHEN et al., 2017).

2.2 Não Relacionados ao Local de Ação (N-RELA)

A resistência N-RELA abrange mecanismos que limitam a chegada de dose

letal do herbicida ao local de ação. Em contraste com a resistência RELA, a resistência N-RELA é mais complexa. Isso ocorre porque a resistência N-RELA é normalmente controlada por múltiplos genes, em que cada gene pode contribuir para a redução da ação fitotóxica do herbicida na planta (DÉLYE, 2013).

A resistência N-RELA pode ocorrer devido à diminuição da absorção do herbicida pela planta, alteração na translocação, sequestro ou compartimentalização do herbicida, incremento de metabolização do herbicida e rápida necrose. Desses, a metabolização do herbicida (também denominada de detoxificação) é, com certeza, o mecanismo mais comum e mais bem compreendido (POWLES; YU, 2010). Ainda, do ponto de vista do manejo de plantas daninhas, esse tipo de resistência pode estar envolvido com fenômenos de resistência múltipla, em que plantas são resistentes a herbicidas de diversas famílias químicas, pertencentes a diferentes mecanismos de ação (YUAN et al., 2007). Isso torna ainda mais complexo e importante o entendimento dessa resistência, devido à diminuição das opções de herbicidas, já que essas populações podem ser resistentes a herbicidas nunca utilizados (ou ainda nem descobertos). A seguir, serão apresentados e discutidos os principais mecanismos N-RELA.

2.2.1 Diminuição da absorção do herbicida

Este mecanismo de resistência está relacionado com a menor absorção e/ou maior retenção do herbicida nos tecidos vegetais, o que reduz a quantidade de herbicida que é capaz de chegar ao local de ação (CHRISTOFFOLETI; NICOLAI, 2016). A diminuição da absorção já foi relatada para o herbicida glyphosate, herbicidas inibidores da ALS e da ACCase (DÉLYE, 2013). No entanto, não foram identificados os genes que conferem esse tipo de resistência.

Acredita-se que plantas com esse tipo de resistência apresentam diferenças físicas e/ou propriedades químicas que causam alteração da retenção e/ou da absorção do herbicida na cutícula. Como exemplo, o herbicida glyphosate é retido nas folhas de biótipos resistentes das espécies *L. multiflorum* (MICHITTE et al., 2007; NANDULA et al., 2008) e *S. halepense* (VILA-AIUB et al., 2012). Em *L. multiflorum*, o ângulo de contato da gota pulverizada com a folha de plantas resistentes

apresentou-se diferente do observado em folhas de plantas suscetíveis, reduzindo a interceptação e a absorção foliar do herbicida. Ainda, Brunharo et al. (2015) identificaram biótipos de *Chloris elata* com absorção reduzida e maior retenção foliar de glyphosate, que conferiu fator de resistência de 5,4.

Normalmente, a resistência por diminuição da absorção do herbicida é estudada através do uso de herbicida marcado radiotivamente. Em *S. halepense*, a utilização de glyphosate marcado mostrou que a população resistente apresentou redução de 20-30% da absorção do herbicida, quando comparada à população suscetível (VILA-AIUB et al., 2012). Mesmo com menor absorção, como, por exemplo, 30% do aplicado, esse herbicida em geral é suficiente para atingir seu local de ação e causar a morte de plantas. Assim, esse mecanismo costuma causar baixos níveis de resistência em plantas daninhas e, em geral, é considerado de menor importância. Além dos poucos casos identificados, outro fator que limita a importância desse mecanismo de resistência é que as formulações dos herbicidas otimizam sua penetração nas plantas, fazendo com que não sejam esperados altos níveis de resistência.

O principal fator que pode dificultar a identificação do mecanismo de resistência ocasionado pela diminuição da absorção do herbicida é que condições ambientais, como temperatura, disponibilidade hídrica e umidade relativa do ar, interferem nas características foliares das plantas. Assim, vários fatores externos à planta podem alterar a composição e a espessura da cutícula, o que modifica a absorção do herbicida pelas plantas. Com isso, dentro de um mesmo ciclo da vida da planta, ela pode apresentar diferentes taxas de absorção, dependente também do ambiente. Desta forma, a absorção de herbicidas é mais uma característica física, e sua relação com características biológicas de resistência são menos consideradas. Em geral, a seleção imposta pelo herbicida teria baixo efeito em resultar na resistência a herbicidas, e as diferenças encontradas em biótipos resistentes podem estar associadas a variações regulares existentes dentro da espécie. Ainda, muitos dos trabalhos que associam a resistência a herbicidas à menor absorção, não avaliaram a ocorrência de outros mecanismos de resistência.

2.2.2 Translocação diferencial

A translocação do herbicida na planta, do ponto aplicado até seu local de ação, é essencial para a sua eficiência. O caminho a ser percorrido pode ser pequeno, no caso dos herbicidas de contato, ou longo, no caso dos sistêmicos, que se movimentam pelo floema e/ou xilema. Desta forma, alterações na translocação do herbicida podem afetar tanto a ação de herbicidas sistêmicos, como herbicidas de contato em relação à pequena movimentação que estes herbicidas podem apresentar. Assim, a translocação diferencial é um importante mecanismo de resistência, podendo ocorrer através da redução ou do aumento da translocação. A redução da translocação do herbicida pode envolver a restrição no movimento do herbicida dentro da planta e/ou sua compartimentalização. Já a rápida translocação está relacionada, principalmente, à exsudação dos compostos. A seguir, são descritos os principais casos de resistência ocasionados pela translocação diferencial.

a) Translocação reduzida por compartimentalização do herbicida

A translocação do herbicida até ao local de ação pode ser reduzida através do sequestro do herbicida no vacúolo, processo que já foi identificado para os herbicidas glyphosate e paraquat. Embora várias plantas daninhas já tenham apresentado esse mecanismo de resistência, o entendimento bioquímico do mecanismo que confere redução na translocação desses compostos ainda é pouco compreendido.

Casos de resistência por translocação reduzida de glyphosate já foram relatados em espécies como *C. canadensis, L. perenne, L. rigidum, L. multiflorum e S. halepense* (YU et al., 2009; GHANIZADEH; HARRINGTON, 2017). Através de técnicas de *P-NMR* (*Phosphorus-31 nuclear magnetic resonance*), foi verificado que plantas de *C. canadensis* são capazes de enviar rapidamente o glyphosate existente no citoplasma, local onde se encontra a EPSPS, para os vacúolos (GE et al., 2010). Acredita-se que esse processo seja regulado por transportadores de membrana, como os transportadores do tipo ABC (*ATP-binding cassete*) e transportadores de fosfato modificados (GE et al., 2010). Dois transportadores ABC candidatos (M10 e M11) apresentaram expressão relativa superior (quatro vezes) em plantas de *C. canadensis* tratadas com glyphosate, 24 horas após a aplicação do herbicida, com significativa redução na expressão desses genes após esse período (NOL et al., 2012). Em alguns

trabalhos, este mecanismo parece estar ligado à condição luminosa (TANI et al., 2016).

Para o herbicida paraquat, a resistência atribuída ao sequestro vacuolar já foi identificada em espécies do gênero *Conyza*, *Hordeum e Lolium*. Alguns estudos mostraram que o sequestro no vacúolo também parece ser o principal mecanismo que reduz as taxas de translocação desse herbicida, ocasionando altos níveis de resistência (GHANIZADEH; HARRINGTON, 2017). Lasat et al. (1997) encontraram evidências de que biótipos de *Hordeum glaucum* resistentes ao paraquat são capazes de armazenar o herbicida nos vacúolos das raízes. O processo de envio de paraquat para o vacúolo é possivelmente regulado por transportadores como: aminoácido catiônico (CAT), transportadores ABC e transportadores poliamina.

A resistência causada por processos de sequestro vacuolar é normalmente dependente de temperatura. Para o paraquat, temperaturas elevadas podem reduzir a função do transporte vacuolar nas plantas resistentes, o que confere reversão da resistência. Já para o glyphosate, a reversão da resistência ocorre em baixas temperaturas. Por exemplo, biótipos de *C. canadenses*, resistentes ao glyphosate, quando expostos a temperaturas próximas a 20°C, são capazes de sobreviver à aplicação do herbicida. No entanto, quando os mesmos biótipos são conduzidos em temperaturas próximas a 12°C, eles são controlados pelo herbicida (GE et al., 2011). Resultados similares foram verificados para biótipos de C. bonariensis resistentes a glyphosate, provindos da região Sul do Brasil (Figura 4) (Dalazen, - dados em publicação), e para outras espécies como *S. halepense*, *L. rigidum* (VILA-AIUB et al., 2013) e *L. perene* (GHANIZADEH et al., 2015). Os processos fisiológicos envolvidos na supressão do sequestro vacuolar de glyphosate em temperaturas baixas não são elucidados; no entanto, acredita-se que baixas temperaturas podem reduzir a atividade catalítica do transportador (GHANIZADEH; HARRINGTON, 2017). Assim, o conhecimento desse mecanismo de resistência pode favorecer o manejo dos biótipos resistentes. Do ponto de vista prático, essas diferenças podem explicar a variação da eficiência de controle em diferentes lavouras ou em uma mesma lavoura, mas com situações diferentes de aplicação do herbicida.

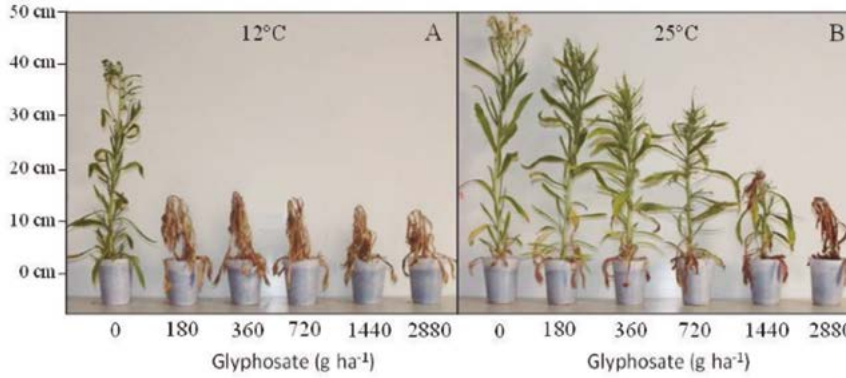


Figura 4. Controle e estatura de plantas da buva (*Conyza bonariensis*), aos 28 dias após a aplicação de doses de glyphosate, em temperaturas do ar de 12°C (A) e 25°C (B).
Fonte: Dalazen et al. (dados em publicação).

b) Aumento da translocação por exsudação radicular

As plantas podem apresentar, também, resistência a herbicidas por exsudação radicular; no entanto, esse mecanismo de resistência é pouco comum (GHANIZADEH; HARRINGTON, 2017). Em *Raphanus raphanistrum*, relatou-se que a resistência a MCPA ocorre devido às altas taxas de exsudação do herbicida pelas raízes do biótipo resistente (JUGULAM et al., 2013). Assim, as plantas resistentes excluem rapidamente o herbicida, de forma a não ficar herbicida em doses letais dentro da planta. O mecanismo de regulação molecular e fisiológica desse processo não é conhecido, porém sabe-se que a exsudação pode ser influenciada por estresses bióticos ou abióticos. Ainda, é hipotetizado o envolvimento de mecanismos passivos (difusão, canais de íons, etc.) e ativos (transportadores ATP) relacionados à secreção desses compostos pelas raízes (GHANIZADEH; HARRINGTON, 2017).

2.2.3 Rápida necrose (RN)

O mecanismo de rápida necrose pode ser entendido como relacionado à redução da translocação do herbicida. No entanto, considera-se que, apesar de as

consequências entre ambos serem similares, as causas são provavelmente distintas, e por isto a RN é apresentada como um mecanismo independente. Além disto, a sintomatologia da RN é distinta dos casos de resistência causada por variação da translocação, o que mais uma vez indica para a sua consideração de forma isolada.
O mecanismo de resistência por rápida necrose, ou então "reação hipersensível", reduz a translocação da molécula do herbicida em plantas resistentes. No entanto, esse processo não ocorre por sequestro no vacúolo. Esse mecanismo foi identificado em biótipos de *Ambrosia trifida* resistentes ao glyphosate. Ainda, no ano de 2015, foram identificados, no Estado do Paraná, acessos de C. sumatrensis que apresentaram o fenótipo atípico de rápida dessecação foliar após a aspersão de 2,4-D, com posterior rebrote das gemas axilares e apical (QUEIROZ et al., 2019), sendo o primeiro relado de rápida necrose ocasionando resistência a herbicidas auxínicos reportados na literatura.

Nos biótipos de *Ambrosia trifida* resistentes ao glyphosate, o herbicida é absorvido, mas apresenta redução na translocação, e as plantas não mostram os sintomas típicos, como clorose, após alguns dias da aplicação. Ao invés disso, poucas horas após a aplicação, as plantas apresentam rápida necrose, mostrando sintoma similar ao ocasionado por herbicidas de contato. As folhas mais velhas apresentam-se secas e mortas seis horas após a aplicação de glyphosate, reduzindo a intensidade dos sintomas nas folhas mais jovens. Após 24 horas da aplicação, as folhas começam a cair da planta. Os tecidos jovens e apicais são menos afetados, permitindo às plantas resistentes sobreviverem pelo crescimento contínuo de meristemas apicais e gemas auxiliares. As plantas resistentes passam a apresentar crescimento semelhante ao das plantas não tratadas, quatro semanas após a aplicação do herbicida. Assim, no mecanismo de resistência por rápida necrose, os biótipos resistentes previnem a translocação do glyphosate das folhas tratadas para as folhas jovens e para os pontos de crescimento (meristemáticos), fazendo com que a planta possa rebrotar e sobreviver à aplicação do herbicida (MORETTI et al., 2017)

Embora o mecanismo que regula a rápida necrose não tenha sido elucidado, acredita-se que a morte programada de células esteja envolvida, processo semelhante ao que ocorre na resposta a patógenos em plantas (QUEIROZ et al., 2019). Não se sabe ao certo como essas plantas sobrevivem ao herbicida glyphosate, porém nenhum mecanismo RELA ou N-RELA conhecido foi encontrado nesses biótipos, apenas

a presença induzida de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) em plantas resistentes, que ocorre 15 minutos logo após a aplicação de glyphosate. O acúmulo de H_2O_2 parece estar envolvido na sinalização da rápida necrose dos biótipos resistentes, para que esses percam suas folhas e eliminem a translocação do herbicida de forma a não atingir o local de ação do herbicida nos meristemas. Conhecer e identificar esse mecanismo de resistência é muito importante, pois já que as plantas isolam o herbicida pela queda das folhas, outros herbicidas, aplicados em mistura com o glyphosate, podem também perder sua eficácia de controle (MORETTI et al., 2017; HARRE et al., 2018).

Mais recentemente, sintomas semelhantes foram encontrados em plantas do gênero Conyza (*Conyza sumatrensis*) no Brasil; entretanto, em uma reação à aplicação do herbicida 2,4-D. Neste caso, os sintomas de necrose foliar ocorrem duas horas logo após a aplicação do herbicida. Em um recente trabalho, Queiroz et al. (2019) encontraram aumento na expressão de espécies reativas de oxigênio logo aos 15 minutos após a aplicação, indicando a possibilidade do envolvimento desta resposta como mecanismo de resistência à translocação do herbicida.

Figura 5. Respostas de plantas do gênero *Conyza*, com rápida necrose foliar, sete dias após a aplicação de 2,4-D (direita), em comparação com uma planta sem rápida necrose (meio) e a testemunha não aplicada (esquerda).
Fonte: Os autores.

2.2.4 Aumento da metabolização (AMe)

O aumento da metabolização (AMe) em plantas daninhas é um dos maiores causadores da resistência por mecanismos N-RELA. Esse processo ocorre por meio da atividade de enzimas detoxificadoras, que transformam o herbicida em compostos menos tóxicos que a molécula original. O aumento da metabolização de herbicidas tem sido relacionado à resistência em várias espécies de plantas daninhas, principalmente nas gramíneas, como *L. rigidum* (YU et al., 2009; BUSI et al., 2011), *A. myosuroides* (DÉLYE et al., 2011), *Echinochloa phyllopogon* (YASUOR et al., 2009) e *Echinochloa cruss-gali* (DALAZEN et al., 2018). Ainda, esse mecanismo de detoxificação é o principal mecanismo de seletividade de herbicidas sobre as culturas.

A detoxificação de herbicidas em plantas é dividida em quatro fases (YUAN et al., 2007) (Figura 4): fase I- conversão ou ativação; fase II- conjugação; fase III- conversão secundária e transporte para o vacúolo; e fase IV- deposição do metabólito final. A seguir, são descritas as fases e as principais enzimas envolvidas no processo de metabolização de herbicidas.

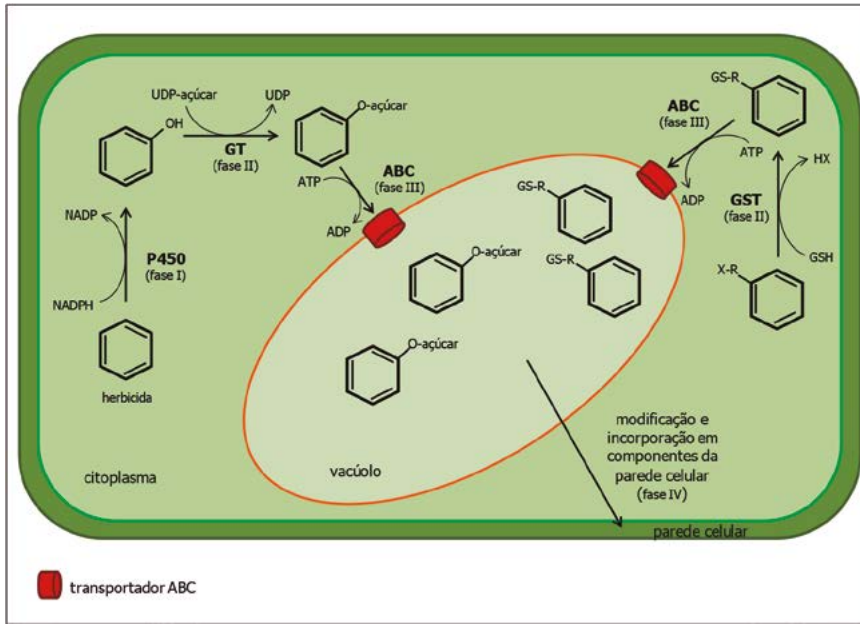


Figura 6. Esquema que representa a ação de enzimas detoxificadoras de herbicidas em plantas. O processo de detoxificação apresenta quatro fases: fase I - atividade monooxigenase por enzimas citocromo P450 monooxigenases; fase II - conjugação de açúcares ou glutationa (GSH) por enzimas glicosiltransferases (GTs) ou glutationa S-transferases (GSTs), respectivamente; fase II- transporte via transportadores ABC, seguido da compartimentalização no vacúolo; e fase IV - incorporação na parede celular

Fonte: Dalazen et al. (2016).

2.2.4.1 Fase I da metabolização

Na fase I, a molécula do herbicida sofre modificações químicas, tais como oxidação, redução, hidrólise, oxigenação ou hidroxilação. Desse processo, resultam moléculas mais hidrofílicas e menos móveis nas plantas, o que restringe sua distribuição nas células e nos tecidos. Nessa fase, atuam principalmente enzimas da família citocromo P450 monooxigenases (P450), que catalisam reações de oxidação e redução de substratos endógenos e xenobióticos (YUN et al., 2005; YUAN et al., 2007). Em geral, as enzimas P450 adicionam um átomo de oxigênio aos herbicidas, por isso são chamadas de monooxigenases, em reações dependentes de oxigênio e NADPH (YUAN et al., 2007).

As enzimas P450 são codificadas por genes pertencentes à família de genes *Citocromo P450 (CYP)*, sendo uma das mais abundantes no reino vegetal. Essas enzimas estão envolvidas na rápida evolução da resistência de biótipos de *L. rigidum*, principalmente devido ao uso de subdoses de herbicidas (BUSI et al., 2013). Diversos autores vêm encontrando maior expressão de genes *CYP*, tais como *CYP81A12 e CYP81A21* em biótipos de *E. phyllopogon* resistentes a inibidores da ALS (IWAKAMI et al., 2014). Em espécies magnoliopsidas a metabolização é menos investigada quando comparada às liliopsidas. Porém, existem relatos da resistência de A. tuberculatus ao herbicida mesotrione causada por metabolização pela enzima P450. Ainda, é importante salientar que as P450 são enzimas responsáveis por garantir a seletividade de herbicidas em culturas, como a seletividade do herbicida diclofop-methyl na cultura do trigo.

Na fase I, também pode atuar a enzima aryl acylamidase (AAA), a qual é responsável pela hidrólise da molécula de herbicida (POWLES; SHANER, 2001). A detoxificação do herbicida propanil (inibidor do fotossistema II) em arroz é um exemplo clássico da detoxificação pela ação dessa enzima e conduz à formação de 3,4-dichloroanilina (DCA) e ácido propiônico. Estudos realizados com biótipos de Echinochloa spp., resistentes ao propanil, também denotaram a participação dessa enzima na detoxificação desse herbicida (HOAGLAND et al., 2004). Em biótipo de *Leptochloa chinensis* resistente ao propanil foi identificada a presença de DCA após a aspersão do herbicida, além do aumento da atividade da enzima aryl acylamidase em relação ao biótipo suscetível (ISMAIL et al., 2013).

2.2.4.2 Fase II da metabolização

Na fase II, fase de conjugação, a molécula do herbicida ou o metabólito resultante da fase I é conjugado com substratos hidrofóbicos ou eletrofílicos (açúcares, aminoácidos ou glutationas). Assim, a fase II pode ocorrer diretamente, sem a necessidade da fase I. O processo de conjugação favorece a desativação de moléculas de herbicidas, pois faz com que ocorra o aumento da solubilidade em água e diminua a fitotoxidade do herbicida (CARVALHO et al., 2009). Nessa fase, já foi verificado o envolvimento das enzimas da família glutationa-S-transferase (GST) e/ou glicosiltransferases (GTs) (Figura 5).

A glutationa S-transferase (GST) é a enzima responsável por catalisar a conjugação do grupo tiol da glutationa (GSH) com centros eletrofílicos de moléculas lipofílicas para formar produtos menos ativos (ÖZTETIK, 2008). Presente na planta, em sua forma reduzida, a GSH atua como um radical eliminador do estresse oxidativo e na detoxificação de xenobióticos. Assim, as GSTs podem ser induzidas por estresses bióticos ou abióticos, tais como o estresse osmótico e temperaturas elevadas, além de estresses oxidativos ocasionados por herbicidas (DIXON et al., 2002).

Em algumas culturas, as GSTs são responsáveis por detoxificar herbicidas, ou seja, estão envolvidas com a seletividade de herbicidas para culturas, tal como a seletividade de atrazina na cultura do milho, que ocorre pela conjugação do herbici-

da com a GSH. Ou ainda, como a detoxificação de cloroacetanilidas e difeniléteres na cultura da soja, realizada pela GST, codificada pelo gene *GmGSTU4* (BENEKOS et al., 2010). O mesmo processo também pode ocorrer em plantas daninhas, conferindo resistência. Por exemplo, a detoxificação de atrazine em plantas resistentes de *Abutilon theophrasti* está relacionada à ação de GSTs.

A detoxificação por conjugação com GSH é verificada principalmente em herbicidas pertencentes aos grupos das clorotriazinas, difeniléteres, cloroacetanilidas, sulfonilureias e ariloxifenoxipropionatos, principalmente em poáceas. Em biótipos de *E. crus-galli* resistentes, verificou-se, posteriormente à aspersão do herbicida quinclorac, o aumento de 6-10 vezes a expressão do gene *EcGST1*, que codifica uma GST (LI et al., 2013). Em *A. myosuroides*, estudos indicam que a resistência a vários herbicidas, observada em alguns biótipos dessa espécie, é ocasionada por uma GST codificada pelo gene *AmGSTF1* (CUMMINS et al., 2013). Cabe salientar que, apesar de a participação de GSTs na detoxificação de herbicidas ser maior em poáceas, também existem informações da atividade dessas enzimas conferindo resistência a herbicidas em plantas de outras famílias botânicas.

Conforme comentado anteriormente, as GTs também estão envolvidas na conjugação de herbicidas. Elas formam um grupo de proteínas envolvidas no metabolismo secundário de plantas. Essas enzimas são capazes de reconhecer hormônios e metabólitos secundários, bem como toxinas naturais e produtos químicos (BOWLES; LIM, 2010). As GTs catalisam a formação da ligação glicosídica entre um açúcar e um aceptor, o qual pode ser uma gama de biomoléculas (incluindo outros açúcares, proteínas, lipídios e moléculas pequenas) (GLOSTER, 2014). Como resultado, formam conjugados solúveis que são compartimentalizados por proteínas de transporte localizadas nas membranas (descrito nas fases III e IV).

Assim como as GSTs, as GTs também podem conjugar herbicidas diretamente, ou seja, sem haver previamente a fase I da metabolização. A conjugação direta de herbicidas via GTs foi verificada em 2,4-D, clopyralid, chloramben, diclofop-methyl, hidrazida maleica, MCPA, metamitron, metribuzin, picloram e quinclorac. Porém, em algumas espécies de plantas, para os herbicidas 2,4-D, acifluorfen, bentazon, dicamba, diclofop-methyl, flamprop-methyl, fluorodifen, sulfonilureias e propanil, foi verificado que a conjugação desses herbicidas só é possível após a ativação por enzimas P450 (fase I da metabolização) (SCHRÖDER; COLLINS, 2002).

Contudo, em alguns casos, a conjugação direta com certos herbicidas, como, por exemplo, 2,4-D e diclofop-methyl, quando mediada por GTs, não resulta em detoxificação estável na planta. Isso ocorre devido à rápida conversão dos conjugados para a forma de herbicida ativo (KREUZ et al., 1996). Diferentemente do observado para as enzimas P450 e GSTs, existem poucos trabalhos mostrando a ação de GTs como mecanismo principal de resistência de plantas daninhas a herbicidas.

2.2.4.3 Fases III e IV da metabolização

Na fase III, os metabólitos oriundos da fase II são transportados para o vacúolo por proteínas, como os transportadores ABC (YUAN et al., 2007). Ainda, durante essa fase, podem ocorrer conjugações secundárias, originando compostos não fitotóxicos. Por fim, na fase IV, os metabólitos derivados do processo de detoxificação, compartimentalizados nos vacúolos, podem ser depositados com componentes da parede celular, tais como pectina, lignina, polissacarídeos e frações proteicas, formando resíduos insolúveis (SKIDMORE, 2000). Desta forma, cabe salientar que os transportadores ABC podem estar envolvidos com mais de um mecanismo de resistência (aumento de metabolização, translocação reduzida/compartimentalização do herbicida, etc.). Eles correspondem a uma superfamília de transportadores ligados à membrana e às proteínas solúveis que realizam o transporte de moléculas através da membrana celular, num processo que envolve a hidrólise de ATP (REMY; DUQUE, 2014). Na maioria dos casos, o transporte envolve a remoção de substratos do citosol para compartimentos extracitosólicos, incluindo o espaço extracelular ou o vacúolo (FRELET-BARRAND et al., 2008).

A maioria dos casos já relatados de resistência por metabolização envolve as fases descritas acima, bem como enzimas detoxificadoras P450, GSTs, GTs, etc. No entanto, nada impede que novos mecanismos sejam descobertos e adicionem outras enzimas responsáveis por esses processos de metabolização. Um exemplo disso é o trabalho desenvolvido por Pan et al. (2019), que documentou uma aldo-keto redutase (AKR) envolvida na oxidação de glyphosate a ácido aminometilfosfônico (AMPA) e glioxilato. Ainda, esse mesmo trabalho foi um dos primeiros a mostrar, claramente, o mecanismo de resistência por aumento da metabolização (AMe), en-

volvido com o processo de resistência a glyphosate em biótipos de *Echinocloa colona* (PAN et al., 2019).

3 EPIGENÉTICA E RESISTÊNCIA

O uso contínuo de herbicidas resultou na seleção de biótipos de plantas resistentes a todos os principais mecanismos de ação de herbicidas em todo o mundo (HEAP, 2020). Além dos casos bem documentados de resistência, consequentes de alterações genéticas, ou seja, de mutações no DNA, eles conferem resistência, seja ela por RELA, seja por N-RELA; atualmente, acredita-se que a regulação epigenética também possa contribuir para a resistência a herbicidas.

Em síntese, modificações epigenéticas são alterações bioquímicas no DNA e/ou histonas, sem modificar a sequência primária do DNA. Desta forma, essas modificações resultam em alelos com a mesma sequência nucleotídica, mas com padrões diferentes de expressão (epialelos) que podem, ocasionalmente, ser transferidos para a progênie. Dentre as principais modificações epigenéticas estão a metilação do DNA e as alterações de histonas (metilação, acetilação, ubiquitinação, etc.). Essas modificações podem ocorrer durante períodos específicos do desenvolvimento das plantas (florescimento, amadurecimento do fruto, etc.), de forma espontânea e/ou induzidas por estresses (bióticos e abióticos). Assim, dependendo das marcas epigenéticas e do local onde elas são inseridas no genoma, elas podem expressar (ativar) ou não expressar (silenciar) genes específicos.

A hipótese de que a regulação epigenética pode estar envolvida na evolução da resistência de plantas daninhas aos herbicidas, é recente (GRESSEL, 2009; DÉLYE, 2013). Ela foi baseada principalmente no fato de que alguns herbicidas podem causar estresse oxidativo similar ao causado por estresses abióticos em plantas (RADWAN, 2012). De fato, verificou-se que aplicações dos herbicidas imazethapyr, 2,4-D e glyphosate alteraram a expressão de genes relacionados a rotas epigenéticas específicas. Assim, após a aplicação do herbicida, vias de sinalização podem ser desencadeadas (MARKUS et al., 2016).

O modelo proposto para explicar o envolvimento da epigenética com a resistência a herbicidas é semelhante ao proposto para explicar a regulação epigenéti-

ca induzida por outros estresses abióticos (MARKUS et al., 2018). Assim, acredita-se que o herbicida ative sinais primários e secundários, desencadeando uma regulação em cascata. Dentre eles, processos de controle transcricional e pós-transcricional podem atuar na regulação da expressão de genes importantes para a resistência a herbicidas, tais como genes P450, GTSs, e transportadores ABC, sendo que estes genes podem estar também sob regulação epigenética. Algumas modificações epigenéticas revertem-se quando a planta supera o estresse. Outras alterações podem ser transmitidas mitoticamente, e até mesmo meioticamente, resultando em herança transgeracional, que é a persistência por uma ou mais gerações.

Em estudo realizado em *Triticum aestivum*, diferentes doses de glyphosate causaram alterações epigenéticas, com variações de 28,3 a 73,9% na metilação do DNA de plantas tratadas (NARDEMIR et al., 2015). Estudos iniciais em *A. thaliana* têm demostrado que os herbicidas imazethapyr, glyphosate e 2,4-D não induziram alterações na metilação global do DNA dessa espécie (Markus, dados não publicados). No entanto, quando diferentes mutantes relacionados com vias epigenéticas específicas foram testados, observou-se maior suscetibilidade aos herbicidas quando algumas rotas epigenéticas estavam nocauteadas (Markus, dados não publicados).

Um estudo com atrazina em arroz indicou que alterações epigenéticas estão envolvidas na ativação de genes específicos, responsáveis pela detoxificação do herbicida (LU et al., 2016). Em *A. thaliana*, verificou-se que alterações epigenéticas estão relacionadas com a ativação e o silencimento de genes como P450, GST e transportadores ABC, ou ainda de fatores de transcrição importantes para a metabolização de herbicidas (KIM et al., 2017). Desse modo, até o momento, não é possível afirmar que a regulação epigenética esteja relacionada a um mecanismo especìfico de resistência a herbicidas, mas já é possível notar que a epigenética apresenta envolvimento com a expressão de genes relacionados à detoxificação de herbicidas.

4 FATORES ENVOLVIDOS NA SELEÇÃO E DISPERSÃO DA RESISTÊNCIA

Embora as mutações que levam à resistência ocorram de forma aleatória, alguns fatores favorecem ou retardam a seleção e a dispersão da resistência de plantas daninhas aos herbicidas. Esses fatores são divididos em genéticos, bioecológicos e agronômicos.

4.1 Fatores genéticos

Os fatores genéticos, como o próprio nome sugere, referem-se às características genéticas da espécie de planta daninha. Entre as características estão a frequência inicial da mutação que confere resistência, características da herança da resistência, tipo de fecundação e fluxo gênico. Em casos com alta frequência inicial de indivíduos resistentes, herança do tipo dominante, fecundação cruzada e ocorrência de fluxo gênico, a seleção e a dispersão da resistência tendem a ser maiores e mais rápidas.

4.2 Fatores bioecológicos

Os fatores bioecológicos estão relacionados com as características do ciclo de vida das plantas daninhas. Espécies com ciclo de vida curto, elevada produção de sementes, baixa dormência das sementes, ocorrência de várias gerações no mesmo ano, fácil dispersão e grande diversidade genética estão propensas a serem problemáticas devido à resistência aos herbicidas. Atualmente, plantas do gênero *Conyza spp*. e *D. insularis* são consideradas as mais problemáticas nas lavouras brasileiras. Essas espécies apresentam algumas características que favorecem a ocorrência, como a elevada produção de sementes e a dispersão pelo vento. Outras espécies, como *A. palmeri*, mesmo que em ocorrendo de forma isolada em algumas propriedades no Estado do Mato Grosso, apresentam elevado potencial de dano no País devido ao número elevado de produção de sementes/planta.

4.3 Fatores agronômicos

Os fatores agronômicos são aqueles que estão relacionados ao herbicida e ao manejo, e que podem ser conduzidos de forma positiva ou negativa, dependendo das técnicas adotadas. Herbicidas que atuam em um único local de ação e passíveis de serem metabolizados pelas plantas são mais predispostos a casos de resistência. Dentre os mecanismos de ação existentes, com base no número de casos registrados de resistência, estão classificados como altamente propensos a selecionar plantas resistentes, os herbicidas inibidores da ALS, do fotossistema II e os inibidores da ACCase, que, somados, correspondem a 57% do total de casos registrados no mundo. São menos propensos a terem problemas herbicidas inibidores da glutamina-sintase e herbicidas inibidores de carotenoides (HEAP, 2019; MOSS et al., 2019). Além disso, herbicidas com período residual prolongado ou muito curto, que ajam por muito tempo ou que demandem várias aplicações, também favorecem a seleção de plantas daninhas resistentes.

Em relação ao manejo, o principal fator que atua na seleção e na dispersão da resistência é a utilização repetida de um mesmo herbicida ou de herbicidas pertencentes ao mesmo mecanismo de ação. Com isso, o processo de seleção não é interrompido, e as plantas resistentes a determinado herbicida passam a dominar a lavoura. Dessa forma, recomenda-se que os produtores adotem práticas como a rotação e/ou a mistura de herbicidas com diferentes mecanismos de ação, incluindo os pré-emergentes.

A aplicação dos herbicidas deve seguir a recomendação de dose, de acordo com a espécie, densidade e estádio das plantas daninhas. Quando aplicados em altas doses, os herbicidas tendem a selecionar aquelas plantas que apresentem os maiores níveis de resistência no campo, tornando a eficácia do herbicida reduzida de maneira acelerada. Utilizando-se de baixas doses, a seleção da resistência também pode ser rápida, como ocorrido para os herbicidas diclofop-methyl e glyphosate em plantas de *L. rigidum*, e *Chenopodium album*, com o uso de subdoses de herbicidas inibidores do fotossistema II (BUSI; POWLES, 2009; YU et al., 2013; BELZ 2018).

Embora o método químico seja o mais usado na grande maioria das lavouras, o produtor deve estar ciente de que a adoção de outros métodos de controle é

extremamente necessária na batalha contra a resistência, pois as plantas podem adquirir resistência à maioria dos métodos de controle químicos utilizados (LAGATOR et al., 2013). Dessa forma, a utilização exclusiva do método químico deve ser evitada. A rotação de culturas pode ser vista como uma das principais formas de combater a resistência. Essa prática permite a utilização de herbicidas com mecanismos de ação diferentes, aporta palhada na superfície do solo, diminuindo a germinação de espécies, principalmente as fotoblásticas positivas, como a buva. Além disso, a rotação de culturas altera o período de controle de plantas daninhas, entre outras vantagens.

Outros fatores agronômicos que também estão envolvidos na ocorrência da resistência podem ser trabalhados: o controle de plantas em estádios iniciais de desenvolvimento, principalmente antes do florescimento, e a produção de sementes, a remoção de escapes após a aplicação de herbicidas, a eliminação de períodos de pousio, a utilização de sementes certificadas, livres de sementes de plantas daninhas resistentes, a limpeza de máquinas, a limpeza de cercas, beiras de estradas e canais de irrigação, a correta condução da cultura, tornando-a competitiva, entre outros (MOSS et al., 2019).

5 PROCESSOS PARA O RELATO DE NOVOS CASOS DE RESISTÊNCIA

Existem critérios que devem ser seguidos para relatar um novo caso de resistência a herbicidas. A Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas (SBCPD), em conjunto com a Associação Brasileira de Ação à Resistência de Plantas Daninhas aos Herbicidas (HRAC-BR) estabelecem, para isso, “Dez passos para relatos de novos casos de resistência de plantas daninhas a herbicidas no Brasil”, que são:

1. Certificar-se de que as plantas que sobreviveram à aplicação do herbicida a campo foram tratadas de acordo com a recomendação de bula, especialmente em relação à dose indicada para o estágio de desenvolvimento da espécie, sendo necessária a coleta de informações sobre sua localização (Coordenadas geográficas).

2. Coletar sementes das plantas com suspeita de resistência a campo e

conduzir dois experimentos de curva de dose-resposta em casa de vegetação. Ou seja, submeter plantas originadas destas sementes às aplicações em doses crescentes do referido herbicida, variando doses abaixo e acima das doses recomendada pela bula. O primeiro experimento de curva dose-resposta deve ser realizado com as plantas originadas das sementes coletadas no campo. O segundo experimento deve ser realizado com as plantas originadas de sementes coletadas das plantas sobreviventes do primeiro experimento, nos tratamentos onde foi aplicada a dose recomendada ou a dose acima desta. Ambos os experimentos devem ser conduzidos, utilizando-se, como efeito comparativo, de plantas suscetíveis da mesma espécie e, preferencialmente, do mesmo local ou região, respeitando-se as exigências da análise estatística durante o processamento de dados. Neste passo, pode-se obter o auxílio de Instituições de Ensino e Pesquisa, as quais podem ser indicadas pelo próprio HRAC.

3. Submeter os dados obtidos no passo anterior (sejam eles controle visual de plantas sejam dados de massa) a uma regressão não linear, de preferência do tipo S-Logística, para se determinarem o GR50, GR90 e GR100 (dose necessária para reduzir a massa seca em 50; 90 e 100%) e a DL50, DL90 e DL100 (dose necessária para o controle de 50; 90 e 100%) de cada população. Também deve ser determinado o fator de resistência (FR) da população supostamente resistente, utilizando-se do ponto de inflexão da curva de dose-resposta, dividindo o valor da população suspeita pelo obtido da população suscetível.

4. Identificar a espécie de forma conclusiva, utilizando-se de "Chaves de identificação botânicas" (Chaves dicotômicas) e, caso necessário, de técnicas moleculares.

5. Considerar o questionário que se segue, sendo que todas as respostas devem ser "sim":

5.1. O caso atende à definição de Resistência de Plantas Daninhas em relação a sobreviver à máxima dose registrada do herbicida para a espécie avaliada?

5.2. A confirmação ocorreu por meio de resultados obtidos por protocolos com base científica?

5.3. Foi comprovada a hereditariedade da resistência da planta daninha ao herbicida? Foram realizados os dois experimentos?

5.4. Existe um impacto prático potencial agronômico da resistência relatada?

5.5. A espécie envolvida foi identificada botanicamente de forma conclusiva e não é resultado de uma seleção deliberada/artificial?

6. Serão considerados biótipos resistentes aqueles que atenderem aos passos anteriores.

7. Enviar para o Comitê de Resistência de Plantas Daninhas da SBCPD (sbcpd@sbcpd.org) arquivo (pdf) contendo os resultados das curvas dose-resposta, tabelas com os valores de GR, DL e FR obtidos nos dois experimentos realizados em casa de vegetação e informações gerais, tais como: data e localização da coleta (município), estádio da planta daninha no momento da aplicação, dados da aplicação (volume de calda, tipo de ponta, produto(s), dose(s), adjuvantes, condições ambientais) e outras informações pertinentes.

8. Após a análise dos dados pelo Comitê de Resistência da SBCPD e considerado em conformidade com os Critérios para relatos oficiais estatísticos de plantas daninhas resistentes a herbicidas da SBCPD, o relato será inserido no site da SBCPD e encaminhado pelo Comitê de Resistência da SBCPD para o HRAC-BR e para o website www.weedscience.org.

9. Um comunicado formal da SBCPD será enviado aos relatores do caso e divulgado amplamente aos envolvidos com o setor agrícola.

10. Os relatores do caso, com o apoio da SBCPD e do HRAC-BR, deverão elaborar estratégias de manejo das áreas e divulgar amplamente, principalmente na região onde o caso foi identificado, opções de controle e contenção dos casos de resistência.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Vários mecanismos atuam de forma individual ou conjunta nos processos de resistência de plantas daninhas aos herbicidas. Mecanismos RELA incluem modificações que geram insensibilidade aos herbicidas ou maior produção da enzima-alvo. Por sua vez, mecanismos de resistência N-RELA incluem modificações em genes envolvidos em processos que limitam a chegada de dose letal do herbicida ao local de ação. Incluem-se nessa categoria a redução na absorção, a translocação, a detoxificação e a necrose rápida.

Conhecer os mecanismos de resistência é fundamental para o manejo adequado de plantas daninhas, e, também, a partir do entendimento desses processos, prevenir o aumento no número de casos de resistência. O aumento recente no número de casos de resistência múltipla acende uma luz vermelha, uma vez que ocorre a redução no número de opções de herbicidas eficientes para esses casos. Ainda, deve ser considerada a ausência de descoberta de novos mecanismos de ação nas últimas décadas.

Estima-se que as perdas atuais de produtividades dos cultivos devido à interferência de plantas sejam as mesmas observadas na década de 1960 (NEVE et al., 2009). Isso denota uma verdadeira corrida entre a evolução das plantas daninhas e as modernas técnicas de controle descobertas a partir daquela data, como herbicidas, cultivos transgênicos, adjuvantes, tecnologia de aplicação, além do conhecimento gerado e difundido pelos pesquisadores, extensionistas e produtores.

A resistência de plantas daninhas aos herbicidas deve ser encarada como um dos grandes problemas da agricultura moderna no Brasil e no mundo. A utilização de herbicidas pode ser vista como a ferramenta mais importante no manejo de plantas daninhas. Contudo, fica claro que, se utilizados de maneira equivocada, o surgimento e a distribuição da resistência acentuam-se, comprometendo a eficiência de importante tecnologia.

Persiste por parte de muitos a ideia de que um novo herbicida ou evento de transgenia seja lançado e resolva todos os problemas do manejo de plantas daninhas. Na verdade, isso já ocorreu com o glyphosate e a soja resistente a esse herbicida (Glyphosate Resistant), e vimos que, em pouco mais de uma década de utilização, mais de 50% da área cultivada com soja apresenta, pelo menos, uma espécie resistente a esse herbicida. Dessa forma, mais do que nunca, a adoção de práticas de manejo integradas faz-se necessária para que a resistência de plantas daninhas se torne um problema ainda maior.

REFERÊNCIAS

ALCÁNTARA-DE LA CRUZ, R. et al. Target and non-target site mechanisms developed by glyphosate-resistant hairy beggarticks (*Bidens pilosa L.*) populations from Mexico. **Front Plant Sci** , v. 7, p. 1492, 2016.

ANTHONY, R.G. et al. Herbicide resistance caused by spontaneous mutation of the cytoskeletal protein tubulin. **Nature**, v. 393, n. 6682, p. 260-263, 1998.

BELZ, R. G. Herbicide hormesis can act as a driver of resistance evolution in weeds – PSII-target site resistance in *Chenopodium album* L. as a case study. **Pest Manag Sci.**, v.74, p. 2874-2883, 2018.

BENEKOS, K. et al. Overexpression of a specific soybean GmGSTU4 isoenzyme improves diphenyl ether and chloroacetanilide herbicide tolerance of transgenic tobacco plants. **Journal of Biotechnology**, v. 150, n. 1, p. 195-201, 2010.

BERES, Z. T. et al. Overexpression of a native gene encoding 5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate Synthase (EPSPS) may enhance fecundity in Arabidopsis thaliana in the absence of glyphosate. **International Journal of Plant Sciences**, v. 179, p.390-401, 2018.

BOWLES, D.; LIM, E.K. Glycosyltransferases of small molecules: their roles in plant biology. **Encyclopedia of life sciences.** In: ELS. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2010.

BRUNHARO, C.A.C.G. R**esistência da planta daninha capim-branco (*Chloris polydactyla*) ao herbicida glyphosate.** 2014. 154p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

BUSI, R.; POWLES, S. B. Evolution of glyphosate resistance in a *Lolium rigidum* population by glyphosate selection at sublethal doses. **Heredity**, v. 103, p. 318–325, 2009.

BUSI, R.; NEVE, P.; POWLES, S. B. Evolved polygenic herbicide resistance in *Lolium rigidum* by low-dose herbicide selection within standing genetic variation. **Evolutionary Applications**, v. 6, n. 2, p. 231-242, 2013.

BUSI, R.; VILA-AIUB, M.M.; POWLES, S.B. Genetic control of a cytochrome P450 metabolism-based herbicide resistance mechanism in *Lolium rigidum*. **Heredity**, v.106, n.5, p.817-824, 2011.

CARVALHO, S. J. P. et al. Herbicide selectivity by differential metabolism: considerations for reducing crop damages. **Scientia Agricola**, v. 66, n. 1, p. 136-142, 2009.

CHEN, J.Y., et al. Dinitroaniline herbicide resistance in a multiple-resistant Lolium rigidum population. **Pest Management Science**, v.74, n.4, p.925-932, 2018.

CHRISTOFFOLETI P. J.; NICOLAI, M. **Associação brasileira de ação à resistência de plantas daninhas aos herbicidas**. 4. ed. ESALQ, 2016.

CUMMINS, I. et al. Key role for a glutathione transferase in multiple-herbicide resistance in grass weeds. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 110, n. 15, p. 5812-5817, 2013.

DALAZEN, G., et al. Degradation enhancement as the mechanism of resistance to imazethapyr in barnyardgrass. **Planta Daninha**, v.36, 2018.

DÉLYE, C. Unravelling the genetic bases of non-target-site-based resistance (NTSR) to herbicides: a major challenge for weed science in the forthcoming decade. **Pest Management Science**, v.69, n.2, p.176-187, 2013.

DELYE, C., et al. Molecular bases for sensitivity to tubulin-binding herbicides in green foxtail. **Plant Physiology**, v.136, n.4, p.3920-3932, 2004.

DELYE, C.; MATEJICEK, A.; MICHEL, S. Cross-resistance patterns to ACCase-inhibiting herbicides conferred by mutant ACCase isoforms in Alopecurus myosuroides Huds. (black-grass), re-examined at the recommended herbicide field rate. **Pest Management Science**, v.64, n.11, p.1179-1186, 2008.

DÉLYE, C., et al. Non-target-site-based resistance should be the centre of attention

for herbicide resistance research: *Alopecurus myosuroides* as an illustration. **Weed Research**, v.51, n.5, p.433-437, 2011.

DIXON, D. P. et al. Plant glutathione transferases. **Genome Biology**, v. 3, n. 3, p. 1-10, 2002.

FRELET-BARRAND, A. et al. Comparative mutant analysis of Arabidopsis ABCC--type ABC transporters: AtMRP2 contributes to detoxification, vacuolar organic anion transport and chlorophyll degradation. **Plant and Cell Physiology**, v. 49, n. 4, p. 557-569, 2008.

GAINES, T. A. et al. Gene amplification confers glyphosate resistance in Amaranthus palmeri. **Proc. Natl. Acad**. Sci. v. 107, p. 1029-1034, 2010b.

GE, X. et al. Rapid vacuolar sequestration: the horseweed glyphosate resistance mechanism. **Pest Manag. Sci.**, v.66, n.4, p. 345–348, 2010.

GE, X. et al. Glyphosate-resistant horseweed made sensitive to glyphosate: low--temperature suppression of glyphosate vacuolar sequestration revealed by 31P NMR. **Pest Manag. Sci.**, v. 67, n.10, p.1215–1221, 2011.

GHANIZADEH, H.; HARRINGTON, K. C.; JAMES, T. K. Glyphosate-resistant population of *Lolium perenne* loses resistance at winter temperatures. **New Zeal. J. Agri. Res**. v.58, n.4, p.423–431, 2015.

GHANIZADEH, H.; HARRINGTON, K.C. Non-target Site Mechanisms of Resistance to Herbicides. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v.36, n.1, p.24-34, 2017.

GIACOMINI, D. A. et al. Two new PPX2 mutations associated with resistance to PPO-inhibiting herbicides in *Amaranthus palmeri*. **Pest Management Science**, v.73, p.1559-1563, 2017.

GLOSTER, T. M. Advances in understanding glycosyltransferases from a structural

perspective. **Current Opinion in Structural Biology**, v. 28, n. 1, p. 131-141, 2014.

GRESSEL, J. Evolving understanding of the evolution of herbicide resistance. P**est Management Science**, v.65, n.11, p.1164-1173, 2009.

GRONWALD, J. W. Resistance to photosystem II inhibiting herbicides. See Ref. 131, p. 27–60, 1994.

HALL, L.M.; STROME, K.M.; HORSMAN, G.P. Resistance to acetolactate synthase inhibitors and quinclorac in a biotype of false clover (*Gallium spurium*). **Weed Sci**, n. 46, p. 390-396,1998.

HARRE, N.T.; YOUNG, J.M.; YOUNG, B.G. Glyphosate-Induced Antagonism in Rapid Response Giant Ragweed (*Ambrosia trifida*). **Weed Technology**, v.32, n.1, p.52-59, 2018.

HILDEBRANDT, T. M. et al. Amino acid catabolism in plants. **Molecular plant**, v. 8, p. 1563-1579, 2015.

HOAGLAND, R. E. Metabolically based resistance to the herbicide propanil in *Echinochloa species*. **Weed Science**, v. 52, n. 3, p. 475-486, 2004.

HOCHBERG, O.; SIBONY, M.; RUBIN, B. The response of ACCase-resistant Phalaris paradoxa populations involves two different target site mutations. **Weed Research**, v.49, n.1, p.37-46, 2009.

ISMAIL, B. S.; JULIANA, B. K.; CHUAH, T. S. Propanil resistance in sprangletop (*Leptochloa chinensis* [L.] Nees) caused by enhanced propanil detoxification. **Pakistan Journal of Botany**, v. 45, n. 6, p. 2111-2117, 2013.

IWAKAMI, S. et al. Cytochrome P450 CYP81A12 and CYP81A21 are associated with resistance to two acetolactate synthase inhibitors in *Echinochloa phyllopogon*. **Plant Phisiology**, v. 165, n. 2, p. 618-629, 2014.

JUGULAM, M. et al. Investigation of MCPA (4-chloro-2-ethylphenoxyacetate) resistance in wild radish (*Raphanus raphanistrum* L.). **J. Agric. Food Chem**., v.61, n.1, p.12516–12521, 2013.

KIM, G. et al. Herbicide injury induces DNA methylome alterations in Arabidopsis. **Peerj**, v.5, 2017.

KOO, D. H. et al. Extrachromosomal circular DNA-based amplification and transmission of herbicide resistance in crop weed *Amaranthus palmeri*. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 115, p. 3332–3337, 2018.

KREUZ, K.; TOMMASINI, R.; MARTINOIA, E. Old enzymes for a new job: herbicide detoxification in plants. Plant Physiology, v. 111, n. 2, p. 349-353, 1996.

LAFOREST, M. et al. Acetyl-CoA carboxylase overexpression in herbicide Resistant large crabgrass (*Digitaria sanguinalis*). **Pest Management Science**, v.73, p.2227-2235, 2017.

LAGATOR, M. et al. Herbicide mixtures at high doses slow the evolution of resistance in experimentally evolving populations of *Chlamydomonas reinhardtii*. **The New Phytologist**, v. 198, p. 938–945, 2013b.

LASAT, M.M. et al. Evidence for vacuolar sequestration of paraquat in roots of paraquat-resistant *Hordeum glaucum* biotype. **Physiologia Plantarum**, v. 99, p. 255-262, 1997.

LI, J. et al. Glyphosate Resistance in *Tridax procumbens* via a Novel EPSPS Thr-102-Ser Substitution. **J Agric Food Chem,** v. 66, p. 7880–7888, 2018.

LI, G. et al. Identification and expression pattern of a glutathione S-transferase in *Echinochloa crus-galli*. **Weed Research,** v. 53, n. 5, p. 314-321, 2013.

LIU, W. J. et al. Single-site mutations in the carboxyltransferase domain of plastid acetyl-CoA carboxylase confer resistance to grass-specific herbicides. Proc Natl Acad Sci, v.104, p. 3627–3632, 2007.

LU, Y. C. et al. Genome-wide identification of DNA methylation provides insights into the association of gene expression in rice exposed to pesticide atrazine. **Scientific Reports**, v.6, 2016.

MARKUS, C. et al. Epigenetic regulation - contribution to herbicide resistance in weeds? **Pest Management Science**, v.74, n.2, p.275-281, 2018.

MARKUS, C. et al. Epigenetic modifications are required for herbicide detoxification in Arabidopsis thaliana. In: XXX Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas, 2016, Curitiba. **Anais** do XXX Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas, 2016.

MARTIN, A.; ORGOGOZO, V. The loci of repeated evolution: a catalog of genetic hotspots of phenotypic variation. **Evolution**, v. 67, p. 1235–1250, 2013.

MARTIN, S. L. et al. Glyphosate resistance reduces kochia fitness: Comparison of segregating resistant and susceptible F2 populations. **Plant Science**, v. 261, p. 69-79, 2017.

MCMURRAY, L. S. et al. Induced novel psbA mutation (Ala_{251} to The) in higher plants confers resistance fo PSII inhibitor metribuzin in Lens culinaris. **Pest Management Science**, 2019.

MERROTO JR, **A. Mecanismos de resistência das plantas daninhas aos herbicidas. Boas Práticas Agrícolas**. Dow AgroSciences Webinar, 2017. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=Rr3S37n7baQ&feature=youtu.be&utm_campaign=agradecimento_webinar_aldo_merotto&utm_medium=email&utm_source=RD+Station. Acesso em: 21 jul 2017.

MICHITTE, P., et al. Mechanisms of resistance to glyphosate in a Ryegrass (*Lolium multiflorum*) biotype from Chile. **Weed Science**, v.55, n.5, p.435-440, 2007.

MORETTI, M. L. et al. Glyphosate resistance in *Ambrosia trifida*: Part 2. Rapid response physiology and non-target-site resistance. **Pest Management Science**, 2017.

MOSS, S. et al. A herbicide resistance risk matrix. **Crop Protection**, v. 115, p.13-19, 2019.

MOSS, S. Herbicide Resistance in Weeds. In: HATCHER, P.; FROUD-WILLIAMS, R.J. (Eds.). **Weed Research: Expanding horizons**. John Wiley & Sons: Chichester, UK, 2017. 456p.

MOSS, S. R. Herbicide-resistance in weeds. In: HATCHER, P.; FROUD-WILLIAMS, R.J. (Eds.), **Weed Research: Expanding Horizons**. John Wiley & Sons: Chichester, UK, 2017a, p. 181–214.

NANDULA, V.K. et al. Glyphosate tolerance mechanism in Italian ryegrass (*Lolium multiflorum*) from Mississippi. **Weed Science**, v.56, n.3, p.344-349, 2008.

NARDEMIR, G. et al. Determination of genetic and epigenetic effects of glyphosate on *Triticum aestivum* with RAPD and CRED-RA techniques. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 27, n. 2, p. 131-139, 2015.

NEVE, P.; VILA-AIUB, M.; ROUX, F. Evolutionary-thinking in agricultural weed management. **New Phytol**, v. 184, n. 4, p. 783-93, 2009 dec. Doi: 10.1111/j.1469-8137.2009.03034.x. Epub 2009 set 23.

NOL, N. et al. Shikimate leaf disc assay for early detection of glyphosate resistance in *Conyza canadensis* and relative transcript levels of EPSPS and ABC transporter genes. **Weed Research**, v. 52, p.233-241, 2012.

ÖZTETIK, E. A. Tale of Plant Glutathione S-Transferases: Since 1970. **Botanical Re-**

view, v. 74, n. 3, p. 419-437, 2008.

GARCÍA, M. J. et al. The Triple Amino Acid Substitution TAP-IVS in the EPSPS Gene Confers High Glyphosate Resistance to the Superweed Amaranthus hybridus. **Int J Mol Sci**. , v. 20, n. 10, p. 2396, 2019.

PAN, L. et al. Aldo-keto reductase metabolizes glyphosate and confers glyphosate resistance in *Echinochloa colona*. **Plant Physiol**., v. 181, p. 1519–1534, 2019.

PEROTTI, V. E. et al. A novel triple amino acid substitution in the EPSPS found in a high-level glyphosate-resistant Amaranthus hybridus population from Argentina. **Pest Management Science**, 2018.

PETIT, C. et al. Prevalence of cross- or multiple resistance to the acetyl-coenzyma A carboxylase inhibitors fenoxaprop, clonadifop and pinoxaden in black-hrass (Alopecurus muosuroides Huds.) in France. **Pest Management Science**, v.66, p. 168-177, 2010.

POWLES, S. B.; SHANER, D. L. (Eds.). **Herbicide resistance and world grains**. Boca Raton: CRC Press, 2001.

POWLES, S. B.; YU, Q. Evolution in action: Plants resistant to herbicides. **Annual reviews of plant biology**, v. 61, p. 317-347, 2010.

RADWAN, D. E. M. Salicylic acid induced alleviation of oxidative stress caused by clethodim in maize (*Zea mays* L.) leaves. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 102, n. 2, p. 182-188, 2012.

REMY, E.; Duque, P. Beyond cellular detoxification: a plethora of physiological roles for MDR transporter homologs in plants. **Frontiers in Physiology**, v. 5, n. 201, p. 1-10, 2014.

ROUSONELOS, S. L. et al. Characterization of a Common Ragweed (*Ambrosia arte-*

misiifolia) Population Resistant to ALS- and PPO-Inhibiting Herbicides. **Weed Science**, v. 60, n. 3, p. 335-344, 2012.

SCHRÖDER, P.; COLLINS, C. Conjugating enzymes involved in xenobiotic metabolism of organic xenobiotics in plants. **International Journal of Phytoremediation**, v. 4, n. 4, p. 247-265, 2002.

SKIDMORE, M.W. Bound residues arising from the use of agrochemicals on plants. In: ROBERTS, T. (Ed.) **Metabolism of Agrochemicals in Plants**. Chichister: Wiley, 2000. p. 155-178.

TANI, E. et al. Environmental Conditions Influence Induction of Key ABC-Transporter Genes Affecting Glyphosate Resistance Mechanism in *Conyza canadensis*. I**nternational Journal of Molecular Sciences**, v. 17, 2016.

TAKANO, H.K. et al. Proline-106 EPSPS mutation imparting glyphosate resistance in goosegrass (*Eleusine indica*) emerges in south america. **Weed Science**, v. 67, n. 1, p. 48-56, 2019.

VILA-AIUB, M. M. et al. Glyphosate resistance in perennial *Sorghum halepense* (Johnsongrass), endowed by reduced glyphosate translocation and leaf uptake. **Pest Management Science**, v. 68, n. 3, p. 430-436, 2012.

VILA-AIUB, M. M., et al. Glyphosate resistance in Sorghum halepense and *Lolium rigidum* is reduced at suboptimal growing temperatures. **Pest Management Science.** v. 69, n. 2, p. 430–436, 2013.

VILA-AIUB, M. M. et al. No fitness cost of glyphosate resistance endowed by massive EPSPS gene amplification in *Amaranthus palmeri*. **Planta**, v. 239, p. 793-801, 2014.

YASUOR, H., et al. Mechanism of resistance to penoxsulam in late watergrass *Echinochloa phyllopogon* (stapf) koss. J**ournal of Agricultural and Food Chemistry**, v.57,

n.9, p.3653-3660, 2009.

YU, Q., et al. Diversity of acetyl-coenzyme a carboxylase mutations in resistant Lolium populations: Evaluation using clethodim. **Plant Physiology**, v. 145, n. 2, p. 547-558, 2007.

YU, Q. et al. Distinct non-target site mechanisms endow resistance to glyphosate, ACCase and ALS-inhibiting herbicides in multiple herbicide-resistant *Lolium rigidum*. **Planta**, v. 230, n. 4, p. 713-723, 2009.

YU, Q. et al. Enhanced rates of herbicide metabolism in low herbicide-dose selected resistant *Lolium rigidum.* **Plant, Cell & Environment**, v. 36, p. 818–827, 2013.

YU, Q. et al. Evolution of a double amino acid substitution in the 5-enolpyruvilshikimate-3-phosphate synthase in *Eleusine indica* conferring high level glyphosate resistance. **Pant Physiology**, v. 167, p.1440-1447, 2015.

YUAN, J. S.; TRANEL, P. J.; STEWART, C. N. Non-target-site herbicide resistance: a family business. Trends in Plant Science, v. 12, n. 1, p. 6-13, 2007.

YUN, M. S. et al. Cytochrome P-450 monooxygenase activity in herbicide-resistant and -susceptible late watergrass (*Echinochloa phyllopogon*). **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 83, n. 2-3, p. 107-114, 2005.

ZANGENEH, H. S. et al. Clodinafop-propargyl resistance genes in *Lolium rigidum* guad. populations are associated with fitness costs. **Agronomy-Basel**, v. 8, n. 7, 2018.

ZHANG, C. et al. Alterations in the 5' unstranslated region of the 5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase (EPSPS) gene influence EPSPS overexpression in glyphosate-resistant *Eleusine indica*. **Pest Management Science**, v. 74, p. 2561-2568, 2018.

CAPÍTULO 11

IDENTIFICAÇÃO DE RESISTÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS AOS HERBICIDAS

Arthur Arrobas Martins Barroso[1]
Marcel Sereguim Cabral de Melo[2]
Caio Vitagliano Santi Rossi[3]

[1]Prof. Dr. Universidade Federal do Paraná – UFPR, Setor Agrárias – Curitiba/PR. [2]Bayer Crop Science. [3]Corteva Agriscience

1 INTRODUÇÃO

A resistência de plantas daninhas aos herbicidas, é definida pela capacidade de uma população sobreviver e reproduzir-se, mesmo após receber a aplicação da dose de um herbicida que normalmente seria letal a uma população suscetível. Atualmente a resistência de plantas daninhas está entre os maiores problemas agrícolas do mundo (WSSA, 1998) e a cada ano, são identificados novos casos de resistência no Brasil e no mundo. Existem mundialmente 514 casos únicos de resistência, com 262 espécies, entre 152 dicotiledôneas e 110 monocotiledôneas. No Brasil, cinquenta casos, envolvendo trinta espécies (HEAP, 2020). Além dos casos de resistência simples (resistência de uma espécie a um mecanismo de ação), existem e são crescentes os registros de resistência múltipla (resistência de uma espécie a mais de um mecanismo de ação), como se pode observar na Figura 1.

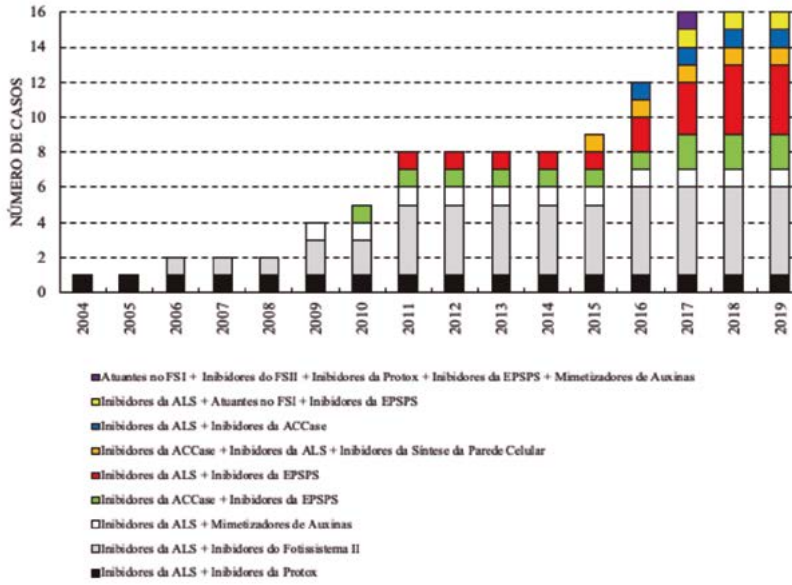


Figura 1. Evolução do número de casos de resistência múltipla a herbicidas no Brasil.
Fonte: Adaptado de HEAP, 2019, em novembro de 2020.

2 IDENTIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA

Uma vez identificadas falhas no controle de determinada planta daninha no campo, deve-se confirmar se tal falha se trata de fato a resistência aos herbicidas ou outros fatores, como, por exemplo, problemas relacionados a tecnologia de aplicação. Para isso, existem alguns critérios que devem ser seguidos e que podem ser consultados na publicação "Dez passos para relatos de novos casos de resistência de plantas daninhas a herbicidas no Brasil" (HRAC & SBCPD, 2018). Dentre estes passos, está a correta identificação da espécie, o estabelecimento de curvas de dose-resposta com doses crescentes do herbicida a ser testado, a confirmação da sobrevivência da planta daninha na dose de registro na bula, a herdabilidade da resistência decorrente de novos testes com uma progênie de plantas sobreviventes, a comparação da resposta ao herbicida com populações suscetíveis, o cálculo do fator de resistência, dentre outros.

Para a confirmação da resistência, é comum a utilização de curvas de dose-resposta de herbicidas em condições de campo ou controladas. Para isso, utiliza-se a molécula com suspeita de resistência e criam-se variações a partir da dose recomendada do herbicida em bula; por exemplo, sendo X a dose de bula, seguem os tratamentos: x/16, x/8, x/4, x/2, x, 2x, 4x, 8x, 16x, ou demais variações. Para isso é importante serem observadas as recomendações de bula, principalmente quanto ao estádio de aplicação e uso de adjuvantes. Estes tratamentos, uma vez aplicados, serão avaliados de duas maneiras: notas visuais de controle, variando de 0 a 100% (em que 0% representa ausência de controle e 100% a morte total da planta) e, ou pela massa seca obtida, geralmente 21 ou 28 dias após a aplicação (adaptado de SBCPD, 1995).

Estes dados serão submetidos à análise estatística e de regressão do tipo log-logística, em que será calculada a dose necessária para o controle ou redução de massa em 50%, sendo respectivamente os valores de LD_{50} ou GR_{50} para cada população. Dividindo-se estes valores entre a população resistente e suscetível, será obtido o fator de resistência da população (FR). Em geral, este fator altera-se com o mecanismo de resistência que a planta apresenta.

A confirmação da resistência, utilizando-se dos experimentos supracitados, pode levar até mais de um ano. Na tentativa de abreviar este período de

confirmação, surgiram algumas opções de métodos mais rápidos, como o proposto pela Syngenta (Syngenta Quick Test). Nesta metodologia, mais adequada para gramíneas em pós-emergência, são coletados perfilhos de plantas que são envasados. Em geral, corta-se a parte aérea do perfilho entre 2,5 e 5 cm e as raízes entre 0,5 e 3 cm para o plantio. Com isso, o tempo até a aplicação dos herbicidas é reduzido, pois logo a planta irá apresentar área foliar suficiente para a aplicação do herbicida (BOUTSALIS, 2001; WALSH et al., 2001).

Outra opção para redução no tempo de confirmação da resistência é a utilização de bioensaios em câmaras de crescimento. Para isso, sementes coletadas de supostas plantas resistentes são postas para germinar em papel para germinação de sementes ou em meios de cultura contendo doses específicas do herbicida a ser testado. Neste caso, a avaliação em geral é feita pela mensuração do tamanho de plântulas e/ou da massa acumulada alguns dias após a semeadura, entre 7 e 10 dias após a instalação. Se de um lado é um teste rápido, de outro é necessária atenção a alguns fatores, como a dificuldade de correlação entre a dose de bula e o herbicida aplicado em solução ou meio de cultura (principalmente para herbicidas não-sistêmicos), bem como a restrição do uso para espécies que apresentem elevada germinação e ausência de dormência (BOURGEOIS et al., 1997; BURGOS, 2015).

Para evitar este problema com sementes, podem-se coletar plântulas no campo da espécie a ser testada na área com suspeita de resistência e transplantá-las no papel de germinação ou em meio de cultura. A planta, logo que atinja seu estádio de aplicação, recebe o produto (BURGOS et al., 2003). Outras alternativas vêm sendo testadas, como o método RISQ test: "Resistance In-Season Quick Test", sendo o transplantio destas plântulas realizado em meios de cultura já com uma dose discriminatória do herbicida, onde avalia-se o crescimento ou não em comparação a uma população suscetível (KAUNDUN et al., 2011).

Outras informações, desde a amostragem e a coleta de sementes de plantas supostamente resistentes, metodologia de detecção, até a interpretação dos dados, podem ser encontradas nas seguintes revisões: "Whole plant and seed biossays for resistance confirmation" (BURGOS, 2015) e "Review: confirmation of resistance to herbicides and evaluation of resistence levels" (BURGOS et al., 2013).

Uma vez confirmada a resistência, seguindo os procedimentos necessários, esse relato deverá ser informado à Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas

Daninhas (SBCPD), e ao HRAC-BR, e será relatado no site "International Herbicide-Resistant Weed Database". Por fim, descrito como décimo passo pelo HRAC & SBCPD (2018), faz parte do relato a elaboração de estratégias de manejo das áreas problemáticas. Para este manejo, é fundamental que se conheçam os processos que ocorrem nas plantas responsáveis pelo fenômeno da resistência.

3 MECANISMOS RELACIONADOS AO LOCAL DE AÇÃO (RELA)

A resistência de plantas daninhas a herbicidas pode estar ligada a dois mecanismos primários de resistência, onde ambos podem estar presentes em uma planta: a resistência relacionada ao local de ação do herbicida (RELA) e a resistência não relacionada ao local de ação do herbicida (N-RELA) (YUAN et al., 2007; YU; POWLES, 2014). Os mecanismos RELA incluem alterações da enzima-alvo causadas por mutações ou deleções de aminoácidos e a superprodução da enzima-alvo, causada pela amplificação ou superexpressão do gene que à codifica.

3.1 Alterações de bases nitrogenadas: mutação e deleção de aminoácidos

Como identificar se mutações em genes podem causar resistência? Por exemplo, mutações no gene EPSPs para a resistência ao glyphosate, no gene ACCase para graminicidas. Inicialmente, deve-se conhecer o mecanismo de ação do herbicida, sendo que existem mecanismos não totalmente esclarecidos, como os mimetizadores de auxinas. Uma vez conhecidos o mecanismo e a enzima onde o herbicida atua, deve-se buscar a sequência gênica responsável pela produção da enzima (gene). Para isso, podem ser consultadas bibliografias específicas que contenham estas sequências ou buscá-las em depósitos de genes, como o "GenBank", site que reúne todas as sequências encontradas no mundo (http://www.insdc.org), tais como a sequência da EPSPS de plantas de capim-amargoso (https://www.ncbi.nlm.nih.gov/nuccore/KX108900.1). Uma vez em posse desta sequência, esta é compa-

rada com os genes da planta-teste. Para isso, deve-se sequenciar o gene da planta supostamente resistente.

O primeiro passo para o sequenciamento é a extração do DNA (ácido desoxirribonucleico) da planta, utilizando protocolos específicos em laboratório como os propostos no método CTAB (DOYLE; DOYLE, 1987) ou pela utilização de kits específicos. Em geral, recolhe-se parte do tecido foliar vegetal, que é macerado em nitrogênio líquido, depositado em pequenos tubos "eppendorfs" e submetidos a extração do material genético (DNA) com "kits", tais como o kit Qiagen DNeasy (Qiagen) ou Wizard Genomic DNA Purification Kit (Promega). Depois, este material será amplificado (replicado) em um termociclador, utilizando-se da técnica de reação em cadeia da polimerase (ou PCR – polymerase chain reaction), "primers" específicos daquele gene mais a enzima Taq polimerase. Estes "primers" são pequenas sequências de nucleotídeos, que funcionam como iniciadores específicos para sintetizar a sequência-alvo em ambos os sentidos. Estes "primers" podem ser formados a partir do conhecimento da sequência gênica em programas ou sites específicos, tais como o "Beacon Designer" (http://www.premierbiosoft.com/qOligo/Oligo.jsp?PID=1), onde a qualidade do seu primer será analisada ou consultando artigos científicos que já possuem estas sequências pré-estabelecidas. Após "desenhado" este "primer", pode ser solicitado em empresas como a Sigma-Aldrich, Qiagen, entre outras. A Taq polimerase é uma enzima responsável pela replicação do material genético. Nesta reação, ainda são adicionados outros compostos, como água, bases nitrogenadas e outros componentes, dependendo do protocolo seguido.

Após a PCR, existirão milhares de cópias de determinada sequência de DNA que será purificada e posteriormente sequenciada. A purificação deste DNA é realizada usando-se "kits", como o PCR Purification Kit, QIAquick (Qiagen). Após a purificação, o sequenciamento do material pode ser feito por empresas particulares ou em laboratórios próprios, utilizando-se de métodos como o sequenciamento de Sanger. Uma vez obtida esta sequência, a mesma será submetida ao pareamento com a sequência conhecida do gene, a fim de se verificarem diferenças de nucleotídeos, que poderão ou não formar diferentes aminoácidos, e a partir destas diferenças, diferentes proteínas e diferentes enzimas, alterando a afinidade do sítio-alvo com o herbicida. Este pareamento pode ser feito em softwares específicos, tais como o Mega CLC genomics Unipro Ugene ou ClustalW2 (Figura 2).

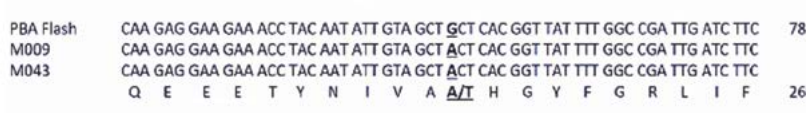


Figura 2. Alinhamento de sequências de nucleotídeos e aminoácidos do gene da proteína D1 em genótipos de lentilha suscetíveis (PBA Flash) e resistentes ao metribuzin (M009 e M043), onde se encontra uma mutação do gene na posição 251. **Fonte:** Adaptado de McMurray et al. (2019).

Conhecer cada uma destas mutações é importante para se avaliar o espectro da resistência. Tem-se, por exemplo, que a resistência aos herbicidas inibidores da ACCase, dependendo da mutação, pode ocorrer para o grupo químico dos ariloxifenoxipropionatos (fops), ciclohexanodionas (dims) e fenilpirazolinas (dens), individualmente, ou nos três grupos juntos. As substituições nas posições 1.781, 2.078 e 2.088 do gene ACCase são as mais preocupantes, uma vez que geram elevados fatores de resistência aos três grupos químicos (POWLES; YU, 2010). Por outro lado, algumas mutações geram resistência a apenas um grupo químico, como as mutações Trp-2.027-Cys e Ile-2.041-Asn, que causam resistência apenas aos "fops" e a mutação Trp-1.999-Cys, que gera resistência apenas ao herbicida fenoxaprop (LIU et al., 2007). Além disso, a ocorrência da resistência em função da mutação depende da espécie de planta daninha. Por exemplo, a substituição Ile-2.041-Asn já foi identificada em *Phalaris paradoxa* (HOCHBERG et al., 2009) e *Alopecurus myosuroides* (DÉLYE et al., 2008), porém confere resistência a cicloxydim apenas na primeira espécie.

Uma vez conhecidas as mutações de nucleotídeos, a resistência pode ser mais facilmente detectada via marcadores "dCAPS". Para entender esse processo, devemos entender o que são enzimas de restrição. Estas enzimas podem ser adquiridas em empresas e possuem a função de cortar o DNA em pontos específicos (sequências de bases). Para isso, criam-se novos "primers" somados a nucleotídeos próximos às mutações destinados a ciar um sítio de restrição na sequência selvagem. Ou seja, plantas não mutadas, selvagens (suscetíveis), sofrerão um corte na sequência gênica, ao passo de que plantas resistentes, devido à presença de uma mutação, não apresentarão a sequência de corte inserida. Esse primer é então utilizado em uma PCR. O resultado da PCR é levado para uma corrida em gel de agarose. O alelo suscetível gera duas bandas no gel, e o resistente, apenas uma (Figura 3).

Maiores detalhes podem ser encontrados na literatura sobre resistência (DÉLYE; BOUCANSAUD, 2017; GIACOMINI et al., 2017; KAUNDUN et al., 2019).

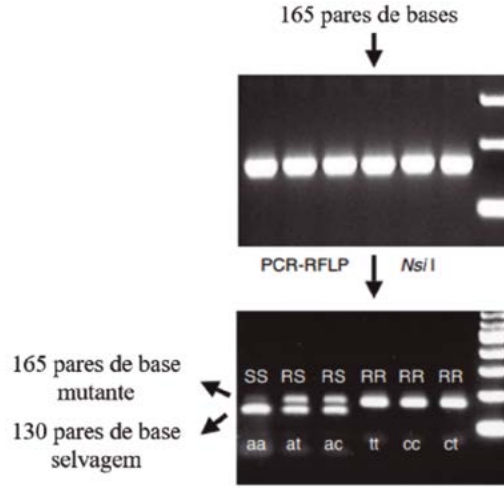


Figura 3. Resultado de PCR em gel de agarose de seis indivíduos de azevém sensíveis (S) e resistentes (R) a ACCase. Adaptado de KAUNDUN; WINDASS, 2006.

3.2 Superexpressão da enzima-alvo

Para se identificar uma possível superexpressão da enzima na planta, segue-se metodologia próxima à supracitada. Porém, desta vez, a extração deverá ser do RNA da planta (ácido ribonucleico). A extração segue os princípios supracitados, utilizando-se de protocolos e "kits" específicos, tais como o Qiagen RNeasy Plant Mini Kit (QIAgen), onde o RNA é extraído e tratado com uma DNase (retira todo DNA da amostra). Este RNA é submetido a uma síntese de cDNA (DNA complementar), utilizando-se de outro "kit", como o Quanta qScript cDNA ou SuperScript III First-Strand Synthesis System. Esta diferença deve-se ao fato de que, agora, este material será submetido a uma análise de PCR em tempo real. Isso significa que a replicação do material genético será contada. Para isso, também é realizada a replicação de outro gene da planta; em geral, constitutivo, para a comparação dos níveis

de expressão do gene da enzima. Pode-se utilizar como gene de controle o gene da ubiquitina, actina, dentre outros (GAINES et al., 2010; GALEANO et al., 2016). No final, tem-se a quantificação relativa da cópia genômica e a transcrição de determinado gene em plantas suscetíveis e resistentes (Figura 4).

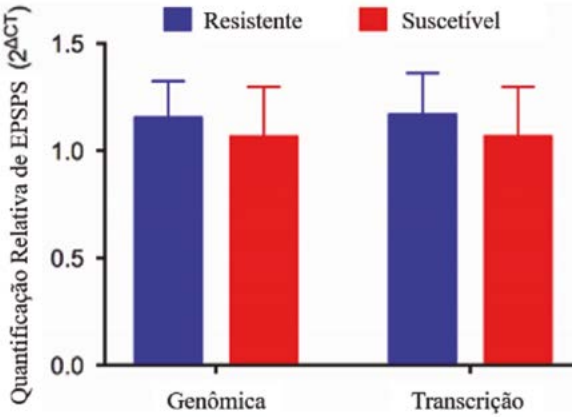


Figura 4. Quantificação relativa da cópia genômica e da transcrição do gene EPSPS em plantas resistentes e suscetíveis de capim-pé-de-galinha (Eleusine indica).
Fonte: Takano et al. (2019).

A presença deste mecanismo de resistência pode ou não influenciar as doses toleradas para cada herbicida, em cada planta, e o comportamento desta população frente a uma suscetível. Tem-se, por exemplo, que para *Amaranthus palmeri*, a maior superexpressão da EPSPS, não está ligada a maiores fatores de resistência, diferentemente do observado para *Kochia scoparia*, onde quanto maior a superexpressão do gene, maior a tolerância ao glyphosate. Neste último caso, a continuidade da aplicação do herbicida só tende a selecionar populações mais e mais resistentes, com maiores números de cópias do gene (GAINES et al., 2016).

Na maioria dos casos, esse mecanismo de resistência não está associado a penalidades adaptativas, como observado em *A. palmeri*. A superexpressão gênica da EPSPS chegou a causar benefícios no desenvolvimento das plantas, elevando a fecundidade e a produção de sementes de plantas resistentes de *Arabidopsis thaliana* (VILA-AIUB et al., 2014; MARTIN et al., 2017; BERES et al., 2018), o que significa

que não basta apenas a remoção do herbicida glyphosate para que a população desapareça ao longo dos anos.

3.3 Maior atividade da enzima-alvo

A maior atividade da enzima-alvo de herbicidas pode decorrer de mudanças em regiões promotoras do gene que irão produzir maiores quantidades de enzimas. A planta com mais enzimas torna-se resistente às quantidades de herbicida aplicadas (GAINES et al., 2010; POWLES; YU, 2010). Para identificar a atividade de enzimas, são necessários trabalhos que quantifiquem compostos ligados à sua ação. Exemplo, a determinação da enzima EPSPS através da medição do fosfato inorgânico liberado da transferência do grupo enolpiruvil da fosfoenolpiruvato (PEP) ao chiquimato-3-fosfato (S3P) (TAKANO et al., 2019), da incorporação dependente de ATP de NaH[^{14}C]O_3 em [^{14}C]Malonil-CoA ou da quantificação de acetilmetilcarbinol para a atividade da ACCase (YE et al., 2018; OSUNA et al., 2012) ou da absorbância de acetoína para a determinação da ALS (MONQUEIRO; CHRISTOFFOLETI, 2001). Estas medições podem ser realizadas utilizando-se de diferentes concentrações (doses) e momentos antes e/ou após a aplicação do herbicida para se conhecer a influência do agente externo; neste caso, o herbicida na atividade enzimática. Cada mecanismo de ação tem sua enzima específica, e as metodologias devem ser consultadas em literatura específica, como na revisão feita por Dayan et al. (2015), "Biochemical markers and enzyme assays for herbicide mode of action and resistance studies".

3.4 Análise de compostos relacionados ao modo de ação do herbicida pela análise de discos foliares

Ainda com relação aos mecanismos RELA, existe uma maneira indireta de se investigar a possibilidade de mutações na enzima onde o herbicida atua. Conhecendo sua rota, por exemplo, para o glyphosate, sabemos que a inibição da EPSPS gera o acúmulo do ácido chiquímico. A determinação deste composto e a ausência

de seu acúmulo após a aplicação do herbicida indicam que a enzima não está sendo inibida, ou que está super expressada.

Nestes casos, podem ser coletados discos foliares de tecidos ativos e sem estresse da espécie em estudo, na área em que se objetiva avaliar a resistência. Neste método, é necessário que haja uma população suscetível para comparação. Estes discos são depositados em placas de titulação contendo o herbicida em solução. Estas doses variam de acordo com o herbicida e podem ser consultadas em literaturas específicas, como para o herbicida glyphosate (SHANER et al., 2005), inibidores do fotossistema II (HENSLEY, 1981), inibidores da PROTOX (FALK et al., 2006), inibidores da ALS (UCHINO et al., 1999). Estas placas são incubadas em condições controladas e com a adição de compostos específicos (ex: HCL para glyphosate), e em seguida o composto é determinado via espectrofotometria para leitura em comprimento de onda específico. A quantidade do composto é determinada pela comparação dos valores obtidos em relação a uma curva-padrão estabelecida com quantidades conhecidas do composto a ser determinado. Uma das dificuldades destes métodos está na necessidade laboratorial para sua execução; entretanto, possibilita rápidas tomadas de decisões entre 24 e 48 horas.

4 MECANISMOS NÃO RELACIONADOS AO LOCAL DE AÇÃO (N-RELA)

4.1 Absorção

Na movimentação reduzida de herbicidas devido a impedimentos, a absorção depende muito das condições ambientais presentes no momento da aplicação; entretanto, mesmo sendo rara, pode ser a responsável pela resistência de plantas daninhas aos herbicidas. A absorção reduzida de herbicidas pode ser resultado de alterações químicas ou morfológicas na cutícula ou epiderme das folhas, ou de mudanças no formato e orientação das folhas que irão interceptar o herbicida (HEAP; DUKE, 2017).

Uma das maneiras de identificar problemas relacionados à absorção de

produtos é a análise da retenção do herbicida. Para analisar a retenção, pode-se pulverizar o herbicida junto com uma solução corante indicadora, como a fluoresceína de sódio. Assim que a solução seca na folhagem, as plantas são imersas em NaOH e leituras são feitas em espectrofluorímetro em comprimentos de 490/510 nm para medir a concentração de fluoresceína. A medida da fluoresceína determina a quantidade de água retida pela folha. Após a medida, pesa-se a folha, e os resultados são expressos como quantidades da solução aplicada por massa seca da planta (GRANGEOT et al., 2006).

Outra análise que pode ser realizada é a observação do ângulo de contato da gota pulverizada com a folha da espécie-alvo. Neste caso, trata-se de uma análise simples, onde a folha-alvo é cortada, depositada em uma superfície e são aplicadas gotas dos herbicidas a serem testados. A deposição, neste caso, é analisada com o uso de microscópios horizontais, e as imagens capturadas para análise em programas específicos (CARVALHO et al., 2011). No caso de falhas de controle devido à absorção de produtos causada, por exemplo, por baixo contato da solução com a folha, podem ser adicionados adjuvantes à calda de pulverização, tais como os surfactantes, que irão melhorar a distribuição do herbicida, aumentando a superfície de contato da gota.

Para verificar diferenças anatômico-foliares, utilizam-se técnicas microscópicas, como a microscopia ótica de luz e a microscopia eletrônica de varredura. Ainda, podem ser realizadas análises bioquímicas das cutículas das plantas, pois sua composição pode influenciar a absorção e consequentemente a eficácia do herbicida aplicado.

Na análise histológica, as amostras são retiradas de folhas da planta-alvo e logo fixadas em soluções conservadoras do material, como soluções de glutaraldeído em tampão fosfato ou em solução “Karnovsky”, que é um preparado de paraformaldeído e glutaraldeído. Depois, são submetidas a uma bomba de vácuo para a retirada do ar dos tecidos. Estas são posteriormente desidratadas pelo uso de soluções crescentes de etanol (25; 50; 75 e 100% v v^{-1}) e embebidas numa mistura de parafina e cera para formar blocos. Estes blocos sofrem cortes transversais, utilizando-se de micrótomos rotativos. As secções são então coradas de acordo com a especificidade da análise. Por exemplo, pode-se utilizar o azul de toluidina ou o Sudan IV, em que o azul de toluidina torna as paredes lignificadas ou suberificadas

azul-esverdeadas, as celulósicas são coradas em tons róseos a roxos, já o corante Sudan IV é um indicador de suberina, cutina e outros lipídeos, aos quais dá uma coloração amarelo-alaranjada ou avermelhada. Os cortes são montados em resina sintética sobre lâminas, analisados e fotomicrografados, utilizando-se de microscópios de luz. Para a escolha do fixador e do corante a serem utilizados, recomenda-se a consulta à literatura do objetivo do pesquisador. Nestas análises histológicas podem ser observadas, características foliares, tais como epidermes, parênquimas, cutícula e vasos condutores (BARROSO et al., 2015).

Para observações morfológicas, na microscopia eletrônica de varredura, as folhas para análise são cortadas e fixadas em solução "Karnovsky". Depois, são lavadas duas vezes em um tampão de fosfato e desidratadas por imersão em 30 min em concentrações crescentes de acetona aquosa (25; 50; 75 e 100% v v^{-1}) e conservadas na acetona pura até sua utilização. As amostras são então desidratadas, utilizando-se de CO^2. As amostras são então depositadas em cilindros de alumínio e cobertas com uma fina camada de ouro. Após esta metalização, as amostras são analisadas em um microscópio eletrônico de varredura. Nestas análises, podem ser observadas as estruturas, tais como estômatos, tricomas e ceras epicuticulares (GRANGEOT et al., 2006; BARROSO et al., 2015).

Através de análises bioquímicas, podem ser analisados os componentes da cera epicuticular. A cera, neste caso, é extraída pela imersão de folhas por breves períodos em clorofórmio, na temperatura ambiente. A solução obtida é então filtrada em papéis analíticos de papel, e o volume, reduzido em um evaporador rotativo. A solução é então transferida para um tubo de cintilação, e todo o clorofórmio é evaporado. A sobra desta etapa são as ceras extraídas que podem ser pesadas e expressas por quantidade de cera, por unidade de área foliar. A análise dos componentes é realizada em um espectrômetro de massas pelo uso da técnica de cromatografia gasosa. Cria-se uma solução específica de ceras que são injetadas no aparelho e, como resultado, têm-se espectros de massa específicos de cada componente, que são expressos de acordo com as áreas dos picos obtidos (CHACALIS et al., 2001).

4.2 Translocação

Outro motivo que impede que o herbicida atinja seu sítio de ação em concentrações adequadas para o controle de plantas daninhas, é o impedimento à translocação do herbicida. Este fenômeno ainda está em estudo e não existem completas respostas, mas, até o momento, são causas desse impedimento: o sequestro de herbicidas para o vacúolo ou paredes celulares, como ocorre em plantas de *Conyza canadensis e Lolium multiflorum* (GE et al., 2011, 2012), o impedimento da translocação do herbicida pela abscisão foliar, denominada em plantas daninhas como "efeito fênix" (HEAP; DUKE, 2017), que ocorre para o glyphosate e, aparentemente, o 2,4-D e a exsudação radicular em plantas, como ocorre em plantas de *Raphanus raphanistrum* para o herbicida MCPA (GHANIZADEH; HARRINGTON, 2017).

A translocação diferencial do herbicida por meio do sequestro vacuolar pode ser confirmada pelo uso da técnica de Ressonância Magnética Nuclear, ou NMR ("Nuclear Magnetic Resonance"), utilizando o fósforo marcado (^{31}P). Nesta técnica, primeiramente, ocorre a aplicação do herbicida, por exemplo, do glyphosate e, posteriormente, a coleta de tecidos "in vivo". Tecidos (folhas e meristemas) novos são protegidos da exposição direta da aplicação com folhas de alumínio. Coletam-se as folhas após um período específico ou vários períodos após a aplicação. As folhas são lavadas repetidamente com água deionizada antes da infiltração do tampão. Essa infiltração trata-se da ocupação dos espaços de ar do tecido foliar com um tampão sobre baixa pressão (perfusão). No caso do glyphosate, usa-se, por exemplo, um tampão de 10 mM de glyphosate. Uma vez realizada a perfusão, as amostras são colocadas em um sistema de perfusão (como o espectrômetro Varian-Inova-500). A partição do herbicida entre o citoplasma e o vacúolo é estabelecida pela magnitude de sinais, usando-se teorias de probabilidade Bayesiana, e por programas estatísticos originando gráficos, como o da Figura 5 (GE et al., 2012).

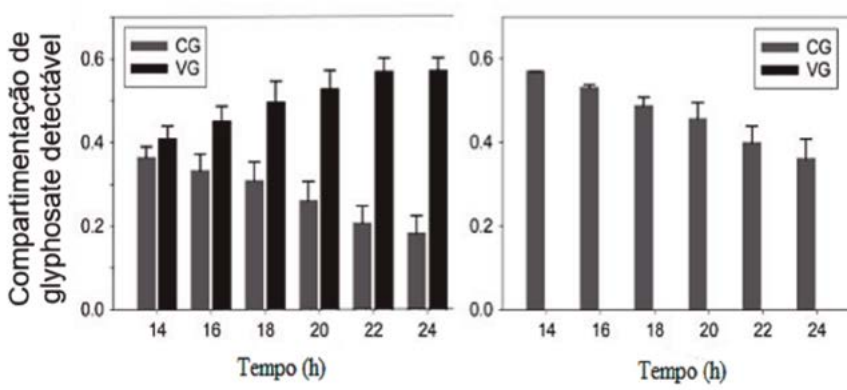


Figura 5. Magnitude da presença de glyphosate no citoplasma (CG) e vacúolo (VG) em folhas de plantas resistentes (esquerda) e suscetíveis (direita).
Fonte: Adaptado de GE et al. (2012).

Curiosamente, o processo de sequestro no vacúolo mostrou-se, em alguns casos, ser dependente da temperatura. Para o glyphosate, em plantas de *Conyza spp*, baixas temperaturas impedem esse sequestro vacuolar, anulando a resistência das plantas daninhas. Para o paraquat, altas temperaturas podem quebrar a função do transporte vacuolar nas plantas resistentes. Esse conhecimento traz importantes informações referentes ao manejo das espécies. Além de explicar diferenças de controle em populações de diferentes regiões, ou de uma mesma região com aplicações em momentos distintos, pode direcionar aplicações em climas mais amenos, no caso do glyphosate, e climas mais quentes, no caso do paraquat, obtendo, assim, maior eficácia de controle da espécie (GHANIZADEH; HARRINGTON, 2017).

Já a detecção do efeito de abscisão foliar, ou comumente conhecido como rápida necrose, observada até o momento para o glyphosate em plantas de *Ambrosia trifida* e supostamente para o 2,4-D em plantas de *Conyza sumatrensis* (De Queiroz et al., 2019), faz com que as folhas que receberam o herbicida rapidamente necrosem, impedindo a translocação do ingrediente ativo para os meristemas.

Para o glyphosate, esse mecanismo é impedido pela aplicação de aminoácidos exógenos, indicando que seu efeito está associado à inibição da via do ácido chiquímico. Outros trabalhos mostram que espécies reativas de oxigênio, como o

peróxido de hidrogênio (H_2O_2), logo aos 15 min após a aplicação, acumulam-se em tecidos de plantas resistentes (VAN HORN et al., 2017). Reconhecer este mecanismo é de fundamental importância, pois com a queda de folhas podem ser perdidos outros herbicidas aplicados em misturas ou em aplicações sequenciais.

Uma das maneiras de se determinar o acúmulo de peróxido de hidrogênio é pela utilização de discos foliares via utilização de diaminobenzidina (DAB). Nesta técnica, discos foliares são coletados antes do tratamento e em horários desejados após a aplicação do herbicida. Estes discos são infiltrados a vácuo com DAB. Depois disso, são incubados em uma solução DAB, em baixo pH, por um período durante a noite. Depois da incubação, os discos são descoloridos pela fervura em 100% de etanol, por 10 minutos, para a remoção da clorofila, antes de serem fotografados e examinados visualmente pela presença de precipitações marrons formadas, onde ocorreu o acúmulo do peróxido de hidrogênio. Os precipitados são resultados da reação entre o peróxido do hidrogênio e o DAB, como observado na Figura 6 (MORETTI et al., 2018).

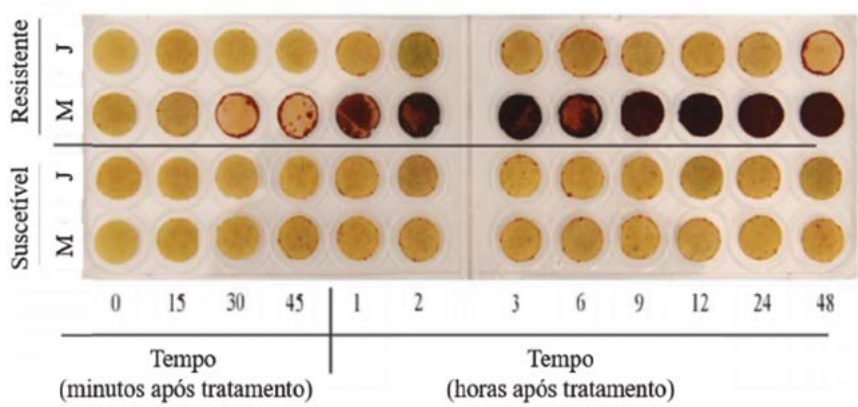


Figura 6. Acúmulo de peróxido de hidrogênio em discos foliares de Ambrosia trifida com o tratamento de glyphosate. Discos de plantas resistentes e suscetíveis de tecidos jovens (J) e maduros (M).
Fonte: Adaptado de Moretti et al. (2017).

Para o herbicida 2,4-D, este mecanismo ainda vem sendo descrito, e não está estabelecido um protocolo seguro para a identificação dos mecanismos nas plantas; entretanto, a aplicação de gotas por micropipetas do produto comercial, em folhas ativas, faz com que estas necrosem logo algumas horas após a aplicação no local de contato folha-solução.

4.3 Metabolização

A metabolização pode ser medida de maneira direta ou indireta. Diretamente, com a aplicação de herbicidas radiomarcados, que será descrito adiante; ou indiretamente, como no caso em que a metabolização decorre da atuação da enzima P450. Para isso, aplicam-se, anteriormente ao herbicida desejado, inibidores enzimáticos, entre os quais o inseticida malathion (SIMINSZKY, 2006; YASUOR et al., 2012). Uma vez que esta enzima esteja ocupada, o herbicida não será ou será menos metabolizado. Com isso, a aplicação do inibidor irá elevar a eficácia do herbicida aplicado. Por exemplo, a aplicação de malathion, duas horas antes da aplicação do imazethapyr, diminuiu a resistência de plantas de *Echinochloa spp* em aproximadamente 2 vezes (MATZENBACHER, 2012).

4.4 Absorção, translocação e metabolismo utilizando-se de herbicidas radiomarcados

Outra técnica, e possivelmente a mais segura, para a confirmação de diferenças na absorção e translocação de herbicidas em plantas, utilizam-se de compostos radiomarcados com ^{14}C. A aplicação ocorre pela mistura do herbicida radiomarcado em uma solução comercial do herbicida, visando a atingir a dose comercial, ou com o produto técnico com elevada pureza química. Escolhem-se folhas específicas que receberão o herbicida marcado, e estas são protegidas. Logo, aplica-se uma solução de herbicida não radiomarcado na planta toda e, após a aplicação, as folhas protegidas são descobertas e recebem a aplicação da solução radiomarcada. A proteção das folhas, neste caso, é necessária para evitar a aplicação do dobro da

dose nas folhas que irão receber o herbicida radiomarcado. Outros pesquisadores preferem não realizar a aplicação do herbicida comercial antes da aplicação do radiomarcado, minimizando o estresse na planta durante a aplicação do radiomarcado (KOGER; REDDY, 2005). Contudo, cabe ressaltar que a aplicação do produto não radiomarcado reflete melhor a aplicação realizada no campo, em que o herbicida atinge diversas partes da planta.

A aplicação do herbicida radiomarcado ocorre com o auxílio de microaplicadores em formas de pequenas gotas (em geral quantidades de 10 µl), evitando-se as nervuras nos limbos foliares. A radioatividade a ser aplicada deve ser suficiente para que seja possível sua detecção pelo Espectrômetro de Cintilação Líquida (ECL), após a oxidação das partes das plantas, e para sensibilização das placas, quando o objetivo é a avaliação qualitativa da translocação, que será descrito adiante. De acordo com Nandula e Vencil (2015), para aplicação na maioria das plantas daninhas anuais, é importante a aplicação de, pelo menos, 170 Bq. Após essa aplicação, em geral, as plantas são coletadas para análise em diferentes períodos onde se separam também as diferentes partes da planta (raiz, caule, folhas tratadas, folhas acima e abaixo das folhas tratadas).

As folhas tratadas são lavadas previamente com solventes específicos para cada herbicida, para retirar o herbicida não absorvido, e a solução da lavagem é quantificada. As partes da planta secas em estufa são submetidas à combustão em um oxidador biológico, liberando $^{14}CO_2$. As análises de radioatividade são realizadas por espectrometria de cintilação líquida (ELC). A absorção do herbicida é determinada como a porcentagem de radioatividade presente no interior de cada parte da planta em relação à radioatividade total recuperada das folhas tratadas. Tem-se, por exemplo, que, na lavagem das folhas tratadas, 90% da radioatividade foi recuperada. Logo, neste caso, a absorção do herbicida será, naquele momento, de 10%.

A radioatividade presente nas partes da planta, menos da folha tratada, é considerada como a translocação do herbicida (FERREIRA; REDDY, 2000). Nestes estudos, é importante a determinação do balanço de massa que é descrito como a soma da radioatividade em todas as partes da planta, calculada em relação à radioatividade aplicada (KNISS et al., 2011). Um balanço de massa igual ou maior de 80% deve ser buscado, para que sejam contabilizadas as perdas por volatilização, exsudação radicular, ou diferenças nas técnicas do estudo (NANDULA; VENCIL, 2015).

Também pode ser realizada análise qualitativa da absorção e da translocação dos herbicidas, em que as plantas aplicadas são expostas às placas. Neste caso, repetem-se os procedimentos descritos acima; contudo, as plantas não entram em combustão, mas são prensadas e secas por alguns dias e, então, submetidas a um filme de raios-X ou a placas fosforescentes. Após a sensibilização, são obtidas radiografias da translocação do herbicida na planta, utilizando-se de um rádio escâner, como na Figura 7 (WALKER; OLIVER, 2008; REIS et al., 2015).

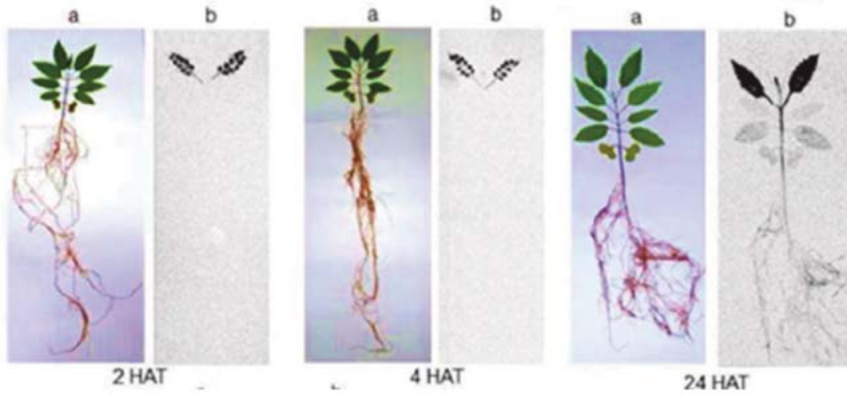


Figura 7. Autografias de Tecoma stans com a aplicação de 14C-aminocyclopyrachlor às 2; 4 e 24 horas após a aplicação. (a) plantas prensadas; (b) autografias da translocação do herbicida na planta.
Fonte: Reis et al. (2015).

Para o estudo de metabolização de herbicidas, repete-se o processo de aplicação de um herbicida radiomarcado com ^{14}C; porém, ao invés de a planta ser submetida à combustão, as plantas são maceradas em nitrogênio líquido e homogeneizadas com metanol, ou outro solvente apropriado. A seguir, submete-se essa solução à centrifugação e coleta-se o sobrenadante. O extrato da planta macerado é seco e depois ressuspendido com metanol, e o líquido dessa suspensão é analisado por cromatografia líquida com detector de radioatividade ou em placas de cromatografia em camada fina (em inglês: "TLC, *Thin-Layer Chromatography*"). Para isso, a placa em que o extrato foi aplicado será posicionada dentro de uma cuba de vidro contendo volume relativamente grande eluente (fase móvel). A cuba será fechada

para favorecer o movimento das amostras na placa (MENDES et al. 2017). O movimento unidirecional ascendente em um fluxo capilar na placa é a mais utilizada técnica em TLC para defensivos agrícolas (FRIED; SHARMA,1999). As placas, então, podem ser lidas em analisador automático, que geraram picos. Também, podem ser utilizadas placas sensíveis à radioatividade que depois, serão submetidas à leitura em rádio escâner.

Os picos obtidos pela cromatografia são separados e identificados, e com base na literatura, busca-se conhecer os picos responsáveis por cada composto (produto parental e seus metabólitos). Se o metabólito estiver radiomarcado, pode-se aplicar o produto original com alta pureza radioquímica e comparar se a região ou o pico de radioatividade se refere ao metabólito ou ao herbicida originalmente aplicado. A partir destes resultados, é possível calcular o Rf (fator de retenção), que é a taxa entre as distâncias que o herbicida percorreu e a distância percorrida pelo solvente. Tem-se, por exemplo, que o valor de Rf (fator de retenção) para o glyphosate é de 0,24, e o de ácido aminometifosfônico (AMPA), composto derivado da metabolização do glyphosate, de 0,45 (MONQUERO et al., 2004). Não necessariamente o estudo de metabolização deriva-se do estudo com herbicidas radiomarcados. Pode-se, por exemplo, realizar a aplicação do herbicida, coletar os tecidos para estes serem avaliados por cromatografia de alta performance e/ou por espectrometria de massas, identificando os compostos da rota onde atua o herbicida (CARVALHO et al., 2012).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Identificar se uma planta é resistente a determinado herbicida é mais simples do que se determinar o porquê. Os avanços tecnológicos nos campos da biologia molecular e da bioquímica têm tornado mais disponíveis os meios para a identificação de mecanismos de resistência, muitas das vezes oferecidos por empresas e/ou Universidades. Aproximar o produtor rural da necessidade destes conhecimentos é fundamental para o manejo da resistência. Novas técnicas, mais ágeis e simples, devem ser tratadas como prioridade nos próximos anos na investigação dos mecanismos de resistência de plantas daninhas a herbicidas, de forma a colaborar

positivamente no manejo de controle e de prevenção aos avanços da resistência de plantas daninhas.

REFERÊNCIAS

BARROSO, A.A.M. et al. Does sourgrass leaf anatomy influence glyphosate resistance? **Comunicata Scientiae**, v.6, p.445-453, 2015.

BERES, Z.T. et al. Overexpression of a native gene encoding 5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase (EPSPS) may enhance fecundity in *Arabidopsis thaliana* in the absence of glyphosate. **International Journal of Plant Sciences**, v. 179, p. 390-401, 2018.

BOUTSALIS, P. Syngenta quick-test: A rapid whole-plant test for herbicide resistance. **Weed Technology**, v.15, p.257–263, 2001.

BOURGEOIS, L. et al. Characterization of cross-resistance patterns in acetyl-CoA carboxylase inhibitor resistant wild oat (*Avena fatua*). **Weed Science**, v.45, p.750–755, 1997.

BURGOS, N. R. Whole-plant and seed biossays for resistance confirmation. **Weed Science**, especial issue, p.152-165, 2015.

BURGOS, N.R. et al. Review: confirmation of resistance to herbicides and evaluation of resistance levels. **Weed Science**, v. 20, p. 61-64, 2013.

CARVALHO, L.B. et al. Detection of sourgrass (*Digitaria insularis*) biotypes resistant to glyphosate in Brazil. **Weed Science**, v. 59, p. 171-176, 2011.

CARVALHO, L.B. et al. Pool of resistance mechanisms to glyphosate in *Digitaria insularis*. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 60, p. 615-622, 2012.

CHACALIS, D. et al. Characterization of leaf surface, wax composition, and control of redvine and trumpetcreeper with glyphosate. **Weed Science**, v. 49, p. 156-163, 2001.

DAYAN, F. et al. Biochemical markers and enzyme assays for herbicide mode of action and resistance studies. **Weed Science**, v. 63, sp1, p. 23-63, 2015.

DE QUEIROZ, A.R.S. et al. Rapid necrosis: A novel plant resistance mechanism to 2,4-D. **Weed Science**, v.68, p. 6–18, 2019.

DÉLYE, C.; BOUCANSAUD, K. A molecular assay for the proactive detection of targer site-based resistance to herbicides inhibiting acetolactate sythase in *Alopecurus myosuroides*. **Weed Research**, v. 48, p. 97-101, 2008.

DÉLYE, C. et al. Cross-resistance pattern to ACCase-inhibiting herbicide conferred by mutant ACCase isoforms in *Alopecurus myosuroides* Huds. (black-grass) re-examined at the recommended herbicide field rate. **Pest Management Science**, v. 64, p. 1.179–1.186, 2008.

DOYLE, J.J.; DOYLE, J.L. A rapid DNA isolation procedure for small quantities of fresh leaf tissue. **Phytochemical Bulletin**, v. 19, p. 11-15, 1987

FALK, J.S. et al. Rapid assay evaluation of plant response to protoporphyrinogen oxidase (Protox) –inhibiting herbicides. **Weed Technology**, v. 20, p. 104–112, 2006.

FERREIRA, J.F.S.; REDDY, K. Absorption and translocation of glyphosate in *Erythroxylum coca* and *E. novofranatense*. **Weed Science**, v. 48, p. 193-199, 2000.

FRIED, B.; SHARMA, J. **Thin-layer chromatography**. 4. ed. New York: Marcel Dekker Inc., 1999.

GAINES, T.A. et al. Gene amplification confers glyphosate resistance in *Amaranthus palmeri*. **Proceedings of the National Academy of Sciences of United States of Ame-**

rica, v. 107, p. 1.029-1.034, 2010.

GAINES, T.A. et al. EPSPS gene copy number and whole-plant glyphosate resistance level in *Kochia scoparia*. **Plos One**, v. 11, 2016.

GALEANO, E. et al. EPSPS variability, gene expression, and enzymatic activity in glyphosate-resistant biotypes of *Digitaria insularis*. **Genetics and Molecular Research**, v. 15, p. 2-15, 2016.

GE X. et al. Glyphosate-resistant horseweed made sensitive to glyphosate: low--temperature suppression of glyphosate vacuolar sequestration revealed by31P NMR. **Pest Manage Science**, v. 67, p. 1.215-1.221, 2011.

GE, X. et al. Vacuolar glyphosate-sequestration correlates with glyphosate resistance in ryegrass (*Lolium spp*.) from Australia, South America, and Europe: a 31P NMR investigation. **Journal of Agriculttural and Food Chemistry**, v. 60, p. 1.243–1.250, 2012.

GHANIZADEH, H.; HARRINGTON, K.C. Perspectives on non-target site mechanisms of herbicide resistance in weedy plant species using evolutionary physiology, **AoB Plants**, v. 9, 2017.

GIACOMINI, D.A. et al. Optimizing RNA-seq studies to investigate herbicide resistance. **Pest Management Science**, v. 74, p. 2.260-2.264, 2017.

GRANGEOT, M. et al. Spray retention, foliar uptake and translocation of glufosinato and glyphosate in *Ambrosia artmisiifolia*. **Weed Research**, v. 46, p. 152-162, 2006.

HEAP, I. **The international survey of herbicide resistant weeds**. Disponível em: <www.weedscience.org>. Acesso em: 10 mai 2020.

HEAP, I.; DUKE, S.O. Overview of glyphosate-resistant weeds worldwide. **Pest Management Science**, v. 74, p. 1.040-1.049, 2017.

HENSLEY, J.R. A method for identification of triazine resistant and susceptible biotypes of several weeds. **Weed Science**, v. 21, p. 70–73, 1981.

HOCHBERG, O. et al. The response of ACCase-resistant *Phalaris paradoxa* populations involves two different target site mutations. **Weed Research**, v. 49. p. 37–46, 2009.

HRAC. **Dez passos para relatos de novos casos de resistência de plantas daninhas a herbicidas no Brasil**. Folder. 2018.

KAUNDUN, S.S. et al. Derived polymorphic amplified cleaved sequence (dPACS): a novel PCR-RFLP procedure for detecting known single nucleotide and deletion--insertion polymorphisms. **International Journal of Molecular Science**, v. 20, 2019.

KAUNDUN, S.S. et al. Syngenta 'RISQ' test: a novel in-season method for detecting resistance to post-emergence ACCase and ALS inhibitor herbicides in grass weeds. **Weed Research**, v. 51, p. 284–293, 2011.

KAUNDUN, S.S.; WINDASS, J.D. Derived cleaved amplified polymorphic sequence, a simple method to detect a key point mutation conferring acetyl CoA carboxylase inhibitor herbicide resistance in grass weeds. **Weed Research**, v. 46, p. 34-39, 2006.

KNISS, A.R. et al. Nonlinear regression analysis of herbicide absorption studies. **Weed Science**, v. 59, p. 601-610, 2011.

KOGER, C.H.; REDDY, K.N. Role of absorption and translocation in the mechanism of glyphosate resistance in horseweed (*Conyza canadensis*). **Weed Science**, v. 53, p. 84-89, 2005.

LIU, W.J. et al. Single-site mutations in the carboxyltransferase domain of plastid acetyl-CoA carboxylase confer resistance to grass-specific herbicides. **Proceedings of the National Academy of Sciences of United States of America**, v. 104, p. 3.627–3.632, 2007.

MARTIN, S.L. et al. Glyphosate resistance reduces Kochia fitness: comparison of segregating resistant and susceptible F2 populations. **Plant Science**, v. 261, p. 69–79, 2017.

MATZENBACHER, F.O. **Caracterização e controle de capim-arroz *(Echinochloa crus-galli)* resistente aos herbicidas do grupo das imidazolinonas e quinclorac em arroz irrigado**. 2012. 212 f. Mestrado (Dissertação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

MCMURRAY, L.S. et al. Induced novel psbA mutation (Ala251 to Thr) in higher plants confers resistance to PSII inhibitor metribuzin in Lens culinaris. **Pest Management Science**, v. 75, p. 1.564-1.570, 2019.

MENDES, K.F. et al. Methodologies to study the behavior of herbicides on plants and the soil using radioisotopes. **Planta Daninha**, v. 35, p. 1–21, 2017.

MONQUERO, P.A.; Christoffoleti, P.J. Bioensaio rápido de determinação da sensibilidade da acetolactato sintase (ALS) a herbicidas inibidores. **Scientia Agricola**, v.58, p.193-196, 2001.

MONQUERO, P.A. et al. Absorção, translocação e metabolismo do glyphosate por plantas tolerantes e suscetíveis a este herbicida. **Planta Daninha**, v. 22, p. 445-451, 2004.

MORETTI, M.L. et al. Glyphosate resistance in *Ambrosia trifida*: Part 2. Rapid response physiology and non-target-site resistance. **Pest management Science**, v. 74, p. 1.079- 1.088, 2018.

NANDULA, V.K.; VENCIL, W.K. Herbicide absorption and translocation in plants using radioisotopes. **Weed Science**, v. 63 (sp1), p.140-151, 2015.

OSUNA, M.D. et al. Resistance to ACCase inhibitors *Eleusine indica* from Brazil involves a target site mutation. **Planta Daninha**, v. 30, p. 675-681, 2012.

POWLES, S.B.; YU, Q. Evolution in action: plants resistant to herbicides. **Annual Review of Plant Biology**, v. 61, p. 317-347, 2010.

REIS, F.C. et al. Uptake, translocation, and control of trumpet flower (*Tecoma stans*) with aminocyclopyrachlor. **Journal of Environmental Science and Health**, Part B, v. 50, p. 727–733, 2015.

SBCPD - SOCIEDADE BRASILEIRA DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS. **Procedimentos para instalação, avaliação e análise de experimentos com herbicidas**. Londrina: SBCPD, 1995. 42 p.

SHANER, D.L. et al. A rapid in vivo shikimate accumulation assay with excised leaf discs. **Weed Science**, v. 53, p. 769-774, 2005.

SIMINSZKY, B. Plant cytochrome P450-mediated herbicide metabolism. **Phytochemistry Reviews**, v. 5, p. 445-458, 2006.

TAKANO, H.K. et al. Proline-106 EPSPS mutation imparting glyphosate resistance in goosegrass (*Eleusine indica*) emerges in South America. **Weed Science**, v. 67, p. 48-56, 2019.

UCHINO, A. et al. Light requirement in rapid diagnosis of sulfonylurea-resistant weeds of *Lindernia spp*. (Scrophulariaceae). **Weed Technology**, v. 13, p. 680–684, 1999.

VAN HORN, C.R. et al. Glyphosate resistance in *Ambrosia trifida*: Part 1. Novel rapid cell death response to glyphosate. **Pest Management Science**, v. 74, p. 1.071–1.078, 2018.

VILA-AIUB, M.M. et al. No fitness cost of glyphosate resistance endowed by massive EPSPS gene amplification in *Amaranthus palmeri*. **Planta**, v. 239, p. 793– 801, 2014.

WALKER, E.R.; OLIVER, L.R. Translocation and absorption of glyphosate in flowering sicklepod (*Senna obtusifolia*). **Weed Science**, v. 56, p. 338-343, 2008.

WALSH, M.J. et al. High frequency of chlorsulfuron-resistant wild radish (*Raphanus raphanistrum* L.) populations across the Western Australian wheatbelt. **Weed Technology**, v. 15 p. 199–203, 2001.

WSSA. **Weed Technology**, v. 12, p. 789, 1998.

YASUOR, H. et al. Quinclorac resistance: a concerted hormonal and enzymatic effort in *Echinochloa*. **Pest Management Science**, v. 68, p. 108-115, 2012.

YE, F. et al. Herbicidal activity and molecular docking study of novel ACCase inhibitors. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, 2018.

YU, Q.; POWLES, S.B. Resistance to AHAS inhibitor herbicides: current understanding. **Pest Management Science**, v. 70, p. 1.340–1.350, 2014.

YUAN, J.S. et al. Non-target-site herbicide resistance: a family business. **Trends in Plant Science**, v. 12, p. 6-13, 2007.

CAPÍTULO 12

CONTROLE DE ESPÉCIES RESISTENTES AO GLIFOSATO

Arthur Arrobas Martins Barroso[1]
Giliardi Dalazen [2]
Acácio Gonçalves Netto[3]
Eduardo Roncatto[4]
Marcelo Rafael Malardo[5]
Catarine Markus [6]
Pedro Jacob Christoffoleti[7]

[1]Prof. Dr. Universidade Federal do Paraná – UFPR, Setor Agrárias – Curitiba/PR. [2]Professor Dr. Universidade Estadual de Londrina (UEL). [3]Doutor em Fitotecnia – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – ESALQ/USP. [4]Mestre em Agronomia – UFPR, Curitiba/PR. [5]Mestre em Fitotecnia – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – ESALQ/USP. [6]Professor(a) Dr(a) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). [7]Doutor e Pós-Doutor em Plantas Daninhas – PJC Consultoria Agrônomia LTDA.

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, iremos abordar o manejo das espécies de plantas daninhas resistentes ao herbicida glifosato no Brasil. Tem-se como oportunidade, portanto, de resumir ao leitor as principais e atuais informações a respeito do controle de: azevém (*Lolium multiflorum)*, capim-amargoso (*Digitaria insularis*), capim-branco (*Chloris elata*), capim-pé-de-galinha (*Eleusine indica*), buva (*Conzya spp*.) e caruru (*Amaranthus palmeri e Amaranthus hybridus*).

2 AZEVÉM

O azevém (*Lolium multiflorum*) é uma planta anual de inverno, que forma touceiras e atinge altura de 0,30 a 0,90 m (LORENZI et al., 2014). É originária do Mediterrâneo e considerada altamente adaptada às condições edafoclimáticas do Sul do Brasil, principalmente ao Estado do Rio Grande do Sul. Além disso, também está difundida em países como Argentina, Uruguai, Austrália e Nova Zelândia, e em alguns países do Hemisfério Norte (NELSON et al., 1997). Esta espécie pertence à família das poáceas, e apresenta como características morfológicas colmos eretos, cilíndricos e sem pelos; bainha estriada e fechada, com presença de lígula curta e esbranquiçada; e aurículas de tamanho médio. A inflorescência é do tipo dística, ereta, com 0,15 a 0,20 m de comprimento, com espiguetas multifloras, tendo os flósculos e lemas aristados (LAMP et al., 2001).

Devido à boa capacidade de produção de forragem (10 a 15 t ha^{-1} de matéria seca por ano), resistência ao frio e elevado valor nutritivo, o azevém é utilizado para compor pastagens anuais, podendo ser consorciado com diversas espécies, como a aveia-branca (*Avena sativa*), aveia-preta (*Avena strigosa*), centeio (*Secale cereale)* e ervilhaca (*Vicia sativa)*. Na região Sul do Brasil, o azevém possibilita pastejo em período de pouca oferta de forragem, que compreende do outono à primavera (PEREIRA et al., 2008). Nessa região, seu ciclo ocorre aproximadamente de março a dezembro, e o florescimento acontece geralmente em setembro, produzindo grandes quantidades de sementes (CARVALHO et al., 2002). Assim, em lavouras conduzidas sob sistema plantio direto, o azevém apresenta boa adaptação, tanto

para formação de pastagens e alimentação animal, como para cobertura do solo e fornecimento de palha para o sistema.

Embora o azevém possua importância como forrageira, ele também pode ser considerado importante planta-daninha, que infesta principalmente culturas de inverno e, também, o início do ciclo de culturas de primavera/verão. Na região Sul do Brasil, o azevém destaca-se por causar prejuízos à cultura do trigo, ocasionando redução da produtividade e da qualidade dos grãos colhidos, além de elevar os custos de produção (VARGAS; BIANCHI, 2011). Conforme Fleck (1980), a interferência do azevém resulta em perdas de até 56% na produtividade do trigo. Em situações com densidade de 24 plantas m^{-2} em competição com o trigo por 35 dias, a redução de produtividade de grãos foi de 26%, e quando a competição ocorreu por todo o ciclo de crescimento, a redução chegou a 62% (AGOSTINETTO et al., 2008). A intensa competição que essa planta daninha ocasiona à cultura está relacionada ao fato de que ambas as espécies apresentam semelhanças morfofisiológicas, o que intensifica a competição pelos mesmos recursos durante os mesmos estádios fenológicos (PAULA et al., 2011).

A capacidade de ressemeadura natural, ou seja, a produção e a queda das sementes no solo, contribui para que o azevém seja a espécie mais distribuída no Sul do Brasil. A disseminação das sementes ocorre principalmente por bovinos, aves e por produtores rurais, que utilizam sementes não certificadas (BIANCHI, 2008). As sementes dispersas no final da primavera permanecem dormentes até à ocorrência de altas temperaturas durante o verão, o que possibilita a superação da dormência e a germinação das sementes durante o próximo outono. Assim, é alta a possibilidade de o azevém germinar e infestar culturas de inverno, quando essa cultura for cultivada em áreas que possuíam pastagens com azevém no ano anterior (BIANCHI et al., 2017). Desta forma, o manejo inadequado de azevém pode resultar em prejuízos no rendimento de cereais de inverno (AGOSTINETTO et al., 2008).

Mais recentemente, os problemas com resistência de azevém aos herbicidas têm dificultado também o manejo pré-semeadura de culturas de verão, como milho e soja. Principalmente para a cultura do milho, trabalhos mostram prejuízos no estabelecimento e na produtividade de grãos causados por plantas de azevém remanescentes da dessecação (VARGAS et al., 2018). De forma geral, os casos de resistência têm reduzido a eficiência da dessecação, aumentando os custos de con-

trole dessa espécie.

O azevém foi a primeira gramínea a apresentar resistência ao glifosato (inibidor da EPSPS) no Brasil (HEAP, 2020). A resistência de azevém ao glifosato, identificada no ano de 2003, intensificou o uso de herbicidas inibidores da ALS e da ACCase, principais alternativas para o controle dessa espécie. Atualmente, além da resistência ao glifosato, já foram identificados biótipos de azevém com resistência a inibidores da ALS, e biótipos com resistência múltipla aos inibidores da EPSPS + ACCase, inibidores da ACCase + ALS e a inibidores da EPSPS + ALS (HEAP, 2020).

Em relação ao controle químico de azevém, serão abordados três cenários distintos, de acordo com as culturas: trigo, milho e soja. De forma geral, preconiza-se que a dessecação do azevém seja eficiente, para que a implantação dos cultivos em sucessão ocorra sem a interferência de plantas remanescentes da dessecação. Ainda, o azevém apresenta substâncias alelopáticas, que podem interferir no estabelecimento de algumas culturas subsequentes (FERREIRA; ÁQUILA, 2000).

Para elucidar esta interferência, um estudo com a cultura do trigo verificou que a dessecação de azevém, sete dias antes da semeadura, causou redução de 12% a 17% na população de plantas de trigo, e de até 10% da produtividade da cultura (BIANCHI, 2008). Já para a cultura do milho, verificou-se que o intervalo de 21 dias entre a dessecação e a semeadura minimiza os efeitos alelopáticos sobre a germinação e o crescimento inicial dessa cultura (NOGUEIRA et al., 2015). Para a cultura da soja, também se preconiza o controle de azevém 20 a 30 dias antes da semeadura, visando ao controle do azevém em tempo suficiente para evitar os efeitos negativos da competição e da alelopatia sobre a cultura (VARGAS et al., 2013). Assim, o planejamento da época de dessecação do azevém em pré-semeadura da cultura subsequente deve ser analisado, a fim de evitar efeitos alelopáticos (NOGUEIRA et al., 2015). Além disso, a dessecação antecipada (~20 dias antes da semeadura) possibilita que a palha esteja seca no momento da semeadura, o que favorece, expressivamente, a "plantabilidade" da lavoura (FRANCHINI et al., 2015).

Por muito tempo, o controle de azevém precedente à semeadura das culturas foi realizado exclusivamente com glifosato, incluindo aplicações com doses abaixo da recomendada. No entanto, o surgimento de biótipos de azevém resistentes a esse herbicida mudou esse cenário. Assim, o uso dos herbicidas graminicidas "fops" e "dims" (inibidores de ACCase) passou a ter grande utilização no controle dessa

espécie. Dois aspectos importantes sobre os graminicidas devem ser ressaltados: primeiro, alguns graminicidas apresentam período de carência entre a dessecação e a semeadura de culturas gramíneas que, se não respeitado, pode afetar culturas como milho, trigo e cevada. Segundo, em áreas com espécies poáceas e dicotiledôneas resistentes ao glifosato, a mistura de 2,4-D com inibidores da ACCase não é recomendada, já que causa antagonismo e diminui a eficiência dos graminicidas.

Destaca-se que poucos herbicidas estão disponíveis e registrados para o controle de poáceas em dessecação. Como alternativas, existem amônio-glufosinato (inibidor de GS), diquat e paraquat (inibidores do FSI), paraquat+diuron (inibidores do FSI e FSII, respectivamente), que controlam também dicotiledôneas por serem não seletivos. No entanto, cabe salientar que a ANVISA decidiu proibir o uso de paraquat no Brasil a partir de setembro de 2020. Em áreas com alta infestação, principalmente quando na mesma área também se encontram outras espécies de difícil controle, como buva, muitas vezes torna-se necessária a realização de dessecação sequencial (CONSTANTIN et al., 2009). A dessecação sequencial geralmente resulta em maior estabilidade e em alta eficiência de controle. Normalmente, utiliza-se um intervalo entre aplicações de 14 a 21 dias, sendo a segunda realizada um a dois dias antes da semeadura. Na primeira aplicação, emprega-se uma combinação de herbicidas com alta mobilidade na planta, como inibidores de EPSPs e ACCase; e na segunda aplicação, herbicidas de baixa mobilidade, como inibidores de GS e inibidores de FSI, podendo ser associados herbicidas com efeito residual.

Em cultivos de inverno, como o trigo, a utilização de herbicidas seletivos é uma importante ferramenta para controle de azevém. Como exemplos de herbicidas utilizados em pós-emergência, podem-se citar os herbicidas clodinafop-propargil e diclofop-metil (inibidores da ACCase), e idosulfuron-metílico e pyroxsulam (inibidores da ALS) (BIANCHI, 2015). Ainda, com recente registro no Brasil, tem-se o herbicida pinoxaden, um herbicida inibidor da ACCase, que pertence a um novo grupo químico, as fenilpirazolinas (DENs). A seletividade desses herbicidas às culturas de inverno ocorre principalmente devido ao uso de protetores, também chamados de "safeners", presentes nas formulações dos herbicidas. O uso de protetores pode aumentar a velocidade de degradação do herbicida pela ativação de genes de detoxificação (HATZIOS; BURGOS, 2004).

As famílias de enzimas nas quais os protetores agem, foram identificadas

e são as mesmas envolvidas nos processos de resistência das plantas daninhas por metabolização, como enzimas do citocromo P450 (CYP), glicosil-transferases (GT), glutationa-S-transferases (GST) e até mesmo proteínas transportadoras ABC (HATZIOS; BURGOS, 2004; POWLES; YU, 2010). Nas culturas do trigo e da cevada, a seletividade aos herbicidas clodinafope-propargil e pinoxaden advém da presença do protetor cloquintocet-mexyl (JESCHKE, 2016). De forma semelhante, esse mesmo protetor proporciona a seletividade do herbicida pyroxsulam nos cereais de inverno (JESCHKE, 2016). Outro exemplo é o protetor mefenpir-dietil, usado para aumentar a seletividade de culturas de inverno ao herbicida iodosulfuron-metil-sódico (AHRENS et al., 2013; ROSINGER et al., 2014).

Mesmo possuindo mobilidade na planta, a eficácia dos herbicidas citados acima depende do estádio de desenvolvimento do azevém, sendo os melhores resultados obtidos quando aplicados em plantas jovens, com 2 a 4 folhas; ou com no máximo um afilho (BIANCHI, 2015). Em pré-emergência na cultura do trigo, o herbicida pendimentalin também apresenta registro para controle de azevém (AGROFIT, 2019). Ainda, em 2020, inicia-se a comercialização de cultivares de trigo que apresentam o sistema Clearfield®, ou seja, que apresentam resistência ao grupo químico das imidazolinonas (inibidores da ALS). Isso também irá contribuir para o controle de azevém, além de outras plantas daninhas importantes, como o nabo (*Raphanus spp.*).

Na cultura do milho, o controle de azevém em pós-emergência apresenta alternativas, como as triazinas e o nicosulfuron, avaliando-se sempre os períodos indicados em bula para aplicação, de forma a evitar a fitotoxidade à cultura (AGROFIT, 2019). Ainda, o sistema Enlist™ pode ser uma importante ferramenta para o controle de azevém, já que, na cultura do milho, o sistema Enlist™ possibilita o uso de "Fops" (ex: haloxifop), além de apresentar resistência aos herbicidas 2,4-D, glifosato e amônio-glufosinato, como o sistema Enlist™ na soja.

Quando comparada ao milho primeira safra, a interferência do azevém na soja é menor. Isso ocorre principalmente porque a semeadura da soja ocorre mais tardiamente em comparação ao milho, período em que o azevém já está completando ciclo e entrando em senescência. Além disso, o controle do azevém remanescente é realizado através da dessecação pré-semeadura da soja. Ainda, o controle de azevém em pós-emergência da soja pode ser realizado através de aplicações de herbicidas inibidores de ACCase.

Assim como para as demais plantas daninhas, o manejo de azevém exige a adoção de medidas integradas de controle. As estratégias devem considerar os objetivos do azevém no sistema. Nas culturas de inverno, como o trigo, o manejo ideal deve contemplar o controle do azevém no ano anterior, com a dessecação antecipada no final do inverno, para impedir que o azevém semente. A intensificação de pastejo e a intensidade de lotação dos animais também podem ser uma estratégia para não deixar o azevém sementar, reduzindo assim o banco de sementes para o próximo inverno. Outras medidas importantes podem prevenir a ocorrência de azevém nas lavouras. Dentre elas; podem ser citados: cuidados na aquisição de animais, limpeza de maquinários e utilização de sementes certificadas de cereais de inverno (trigo, aveia, centeio, triticale, cevada), livres de sementes de azevém. Adotando-se essas medidas, além de evitar a introdução e a dispersão do azevém, o produtor previne a entrada da resistência a herbicidas em sua lavoura.

3 CAPIM-AMARGOSO

O capim-amargoso é uma gramínea pertencente ao gênero Digitaria (CANTO-DOROW, 2001). Nativo da América Latina, é encontrado até no continente asiático, ocorrendo principalmente em pastagens e áreas de grãos (PITELLI; DURIGAN, 2001). Trata-se de uma planta perene que possui metabolismo C4, com florescimento antecipado na presença de maiores quantidades de luz (PYON et al., 1977). Seu florescimento ocorre entre 63-70 dias após a emergência (MACHADO et al., 2006).

A espécie apresenta elevada produção de sementes que são facilmente dispersadas pelo vento, devido ao peso leve e à pilosidade. Suas sementes são fotoblásticas positivas preferenciais porque não dependem de luz para germinação; porém, germinam mais em sua presença. Sementes de plantas resistentes ou suscetíveis ao glifosato germinam no intervalo de temperatura entre 5 e 40 °C, com germinação ótima na faixa de 30 a 35°C. O crescimento inicial da planta é lento até 40 dias após a emergência, quando inicia o processo de perenização com a formação de rizomas (LORENZI, 2008). Após esta fase, ocorre maior perfilhamento e crescimento das plantas, onde seus colmos podem atingir até 1,50 m de altura (KISSMANN;

GROTH, 1997).

No Brasil, existem biótipos resistentes ao herbicida glifosato (inibidor de EPSPS) e biótipos resistentes aos graminicidas do grupo dos "fops" e ao herbicida pinoxaden (inibidores da ACCase) (HEAP, 2020). Até então, não existem biótipos de capim-amargoso resistentes aos dois mecanismos de ação (resistência múltipla) encontrados, o que restringiria ainda mais seu controle.

Não se sabe ao certo o motivo de as plantas do capim-amargoso serem resistentes ao glifosato. Supõe-se que a resistência decorra de diferentes mecanismos presentes em diferentes populações, tais como: maior produção da enzima EPSPS (BARROSO, 2014a), menor translocação (CARVALHO et al., 2012), reduzida absorção ou mutações no gene *EPSPS* (GALEANO et al., 2016). Recentemente, Melo et al. (2019) não encontraram problemas de absorção, translocação ou alterações do gene *EPSPS* em biótipos de capim-amargoso resistentes ao glifosato, o que ressalta a necessidade de mais estudos relativos à espécie. Com relação à resistência aos graminicidas, foi encontrada uma mutação no gene que codifica a enzima ACCase (Trp2027Cys), responsável por conferir baixa resistência ao herbicida pinoxaden e elevada resistência à haloxyfop (TAKANO et al., 2020).

Para o controle do capim-amargoso anterior à semeadura de culturas, é necessário que seja realizada uma dessecação pré-plantio, em geral, com mais de uma aplicação (sequencial). Nesta modalidade, são empregados os herbicidas glifosato e inibidores da ACCase como: clethodim, sethoxydim ou haloxyfop, com aplicação sequencial de herbicidas como paraquat e amônio-glufosinato (GILO et al., 2016; MELO et al., 2017). A necessidade ou não da aplicação sequencial dependerá do estádio em que as plantas de capim-amargoso se encontram. Em plantas com até 3-4 perfilhos, uma única aplicação de glifosato com graminicida promove bons índices de controle. Contudo, em situações com capim-amargoso mais desenvolvido, faz-se necessária a aplicação sequencial para o controle dos rebrotes oriundos dos rizomas. Mesmo o capim-amargoso sendo resistente ao glifosato, este herbicida contribui no controle da espécie e é mantido nas aplicações, em mistura com os inibidores da ACCase. Além disso, aplicação de glifosato é fundamental para o controle de outras espécies presentes na área.

Em situações de plantas entouceradas, já adultas, a integração do controle químico com a roçada tem-se mostrado eficiente no controle de capim-amargoso

(RAIMONDI et al., 2019). Dessa forma, recomenda-se a realização de roçada em altura inferior a 20 cm, com a aplicação posterior de herbicidas (normalmente, a mistura de glifosato + inibidor da ACCase) quando a brotação do capim-amargoso atingir aproximadamente 15 cm, o que ocorre em cerca de 20 dias, dependendo das condições climáticas locais. Essa prática proporciona a redução de, pelo menos, uma aplicação de herbicidas na dessecação pré-semeadura. Em áreas maiores, a baixa operacionalidade da roçada pode ser um fator limitante. Contudo, pode ser adotada em reboleiras, no início da infestação das lavouras.

Na semeadura ou na segunda dessecação pré-semeadur,a podem ser utilizados herbicidas com efeito residual, que irão atuar na pré-emergência da planta daninha (DREHMER et al., 2015; TROPALDI et al., 2017; MELO et al., 2017; ANDRADE JR. et al., 2018). Dentre os principais herbicidas pré-emergentes utilizados, destacam-se atrazina; clomazone; diclosulam; flumioxazina isolada ou em mistura com imazethapyr/diclosulam; s-metolachlor, isolado ou em mistura com diclosulam; e trifluralina (CHRISTOFFOLETI et al., 2012; GEMELLI et al., 2012; ANDRADE, 2019).

Na pós-emergência das culturas, o controle do capim-amargoso é dificultado, principalmente quando as plantas forem oriundas de rebrotes de plantas remanescentes da dessecação, as quais apresentam controle dificultado. Além disso, na pós-emergência da cultura, as opções de herbicidas são limitadas aos que são seletivos. Na soja, têm-se utilizado herbicidas inibidores da ACCase associados ao glifosato, como clethodim; sethoxydim; haloxyfop; e imazapir (inibidor da ALS), em cultivares com a tecnologia Cultivance (ADEGAS et al., 2010). No milho, herbicidas como atrazina, mesotrione e nicosulfuron são recomendados, também com ressalvas para o estádio de desenvolvimento da planta daninha (MELO et al., 2012; BARROSO et al., 2014b; ZOBIOLE et al., 2016).

Por fim, ressalta-se que, em curto prazo, a expectativa é limitada quanto a novas ferramentas que auxiliem no controle do capim-amargoso na pós-emergência de culturas. Resguardar os herbicidas inibidores da ACCase é de extrema importância; pois, atualmente, esses herbicidas representam a principal forma de controle para essa planta daninha. Portanto, a prevenção da seleção e da dispersão de capim-amargoso resistente aos inibidores da ACCase é fundamental. Nesse sentido, a retomada na utilização de pré-emergentes com ação graminicida é uma das alterna-

tivas mais plausíveis no momento. Outra opção de manejo do capim-amargoso é a utilização de culturas de cobertura e/ou consórcio (MECHI et al., 2018). Densidades de palha acima de 4 t ha^{-1} dificultam a germinação das sementes de capim-amargoso, sendo que palhadas de mucuna, feijão-guandu ou braquiária apresentam bom efeito supressor da espécie (REINERT, 2013; PETTER et al., 2015). Somado a isso, outras medidas preventivas, como o controle de focos iniciais, a limpeza de maquinários, beiras de estradas e cercas são fundamentais para o sucesso no manejo de capim-amargoso.

4 CAPIM-BRANCO

O capim-branco (*Chloris spp.*) é uma planta daninha pertencente à família Poaceae, nativa do continente americano e com ampla distribuição geográfica (KISSMANN; GROWTH, 1997). Não se tratava de uma planta daninha encontrada com frequência em áreas agrícolas, mas, atualmente, sua importância, principalmente nas áreas de soja, vem aumentando. Além disso, sua ocorrência em carreadores e bordas de talhões de cana-de-açúcar aumenta a cada ano.

Segundo Carvalho et al. (2005), o capim-branco pode propagar-se por sementes e/ou a partir de rizomas, sendo que a produção de sementes varia de 3 a 30.000 sementes por planta. A espécie apresenta alta produção final de massa seca, podendo, assim, ser uma forte competidora por recursos do meio. Desse modo, Barroso et al. (2014c) observaram que, em competição com a cultura da soja, quando o capim-branco estava em densidades de 20 plantas m^{-2}, o crescimento da cultura foi reduzido acima de 70%. Ainda, existem relatos que demonstram dificuldade no controle dessa espécie em áreas com grande infestação e/ou em estádio avançado de desenvolvimento.

No Brasil, existem biótipos de *Chloris elata* (sinonímia: *Chloris polydactyla*) resistentes ao herbicida glifosato em áreas de soja, com o primeiro relato ocorrido em 2014 (HEAP, 2020), o que pode explicar o rápido aumento em frequência e em densidade da espécie (BARROSO et al., 2014c). É possível que o mecanismo de resistência destes biótipos de capim-branco esteja relacionado à menor absorção do glifosato, já que ainda não foram observadas mutações específicas na sequência do

gene *EPSPS* (BRUNHARO, 2016). A espécie também apresenta tolerância a vários herbicidas, havendo necessidade de aumentar a dose do herbicida glifosato para efetivo controle da espécie em estádios mais avançados, mesmo em biótipos suscetíveis (BRIGHENTI et al., 2007; PLÁCIDO et al., 2013).

Segundo Brunharo (2014), é possível a aplicação de diversos herbicidas em pré-emergência, como, por exemplo, os herbicidas amicarbazone; s-metolachlor e isoxaflutole no milho, ou chlorimuron-ethyl; clomazone; diclosulam; imazethapyr; s-metolachlor; sulfentrazone e metribuzin na soja. Na cana-de-açúcar, existe a opção da aplicação de herbicidas como o amicarbazone e o tebuthiuron. Em pós-emergência, são eficazes os herbicidas haloxyfop e fenoxaprop, que podem ser usados na soja. Placido et al. (2016) avaliaram opções de controle em pós-emergência de vários biótipos de capim-branco oriundos de diferentes locais do Paraná. Os autores observaram controles superiores a 97% quando se associou glifosato a inibidores da ACCase, como clethodim; tepraloxydim; haloxyfop e quizalofop. Na cana-de-açúcar, segundo Malardo et al. (2017), as associações de indaziflam + metribuzin e indaziflam + tebuthiuron, aplicadas em pós-emergência da cultura, foram eficientes no controle de capim-branco, proporcionando porcentagens de controle iguais ou próximas a 100%.

De maneira geral, pode-se afirmar que o manejo de capim-branco se assemelha ao de capim-amargoso. Dessa forma, Gemelli et al. (2013) afirmam que o manejo não pode ser único e pontual, sendo necessária atenção ao comportamento da planta daninha e dos herbicidas ao longo de todo o ano. Da mesma forma que para outras poáceas, o controle não deve ser baseado exclusivamente na utilização de pós-emergentes inibidores da ACCase, para que não ocorra a seleção de biótipos resistentes a esses herbicidas. Vale ressaltar que o uso de manejo integrado é de extrema importância para que haja o manejo eficaz das plantas daninhas. Aparentemente, a ocorrência de *Chloris sp*. é maior em barrancos e beirada das lavouras, onde a cobertura do solo por palhada é deficiente. Isso decorre da necessidade de luz para que ocorra e germinação de plantas daninhas deste gênero (SILVA et al., 2009). Dessa forma, a cobertura do solo com cerca de 2 t ha^{-1} de palhada de cana-de-açúcar é capaz de reduzir a emergência da planta daninha (MALARDO et al., 2017).

5 CAPIM-PÉ-DE-GALINHA

O capim-pé-de-galinha é uma gramínea pertencente ao gênero *Eleusine*. Nativo da Ásia, é encontrado em espaços urbanos, mas, principalmente, em áreas produtoras de grãos. Trata-se de uma das gramíneas mais importantes do mundo, pois já foi encontrada em mais de 60 países e em 50 diferentes culturas. Sua ocorrência abrange todas as regiões do Brasil devido à sua adaptabilidade a climas tropicais, subtropicais e temperados, com adaptação a solos ácidos. Vem tornando-se mais frequente na região Centro-Oeste do País. Possui ciclo anual e metabolismo C4, com crescimento cespitoso (formando touceiras). Alcança até 0,7 m de altura, apresentando crescimento mais prostrado quando há maior incidência luminosa e mais ereto quando a luminosidade é restrita (KISSMANN; GROTH, 1997; LORENZI, 2008). As plântulas possuem coleóptilo em forma de lança, estriado verde-claro e glabro, com a bainha compactada e a lâmina lanceolada. Suas folhas estão mais presentes na base do colmo e são protegidas por bainhas foliares de menor tamanho. Uma característica marcante, que a diferencia das demais gramíneas, é a base do caule achatado e suas inflorescências constituídas por cinco a doze racemos digitados ou subdigitados.

Cada planta pode produzir até 120.000 sementes, dos 38 aos 108 dias após a emergência. As sementes possuem superfície com estrias finas, borda ovalada e coloração escura (violeta). As sementes da espécie apresentam fotoblastismo indiferente e maior fluxo de emergência entre os meses de outubro a janeiro (SALVADOR, 2007). Esse período coincide com a ocorrência de temperaturas diurnas altas, na faixa de 35°C, e temperaturas noturnas na faixa de 20°C, condição considerada ideal para a germinação de capim-pé-de-galinha (ISMAIL et al., 2002). Por necessitar de um período de luz para a germinação, a existência de cobertura vegetal, entre 4 e 8 toneladas por hectare, pode impedir a germinação da espécie (BENEDETTI et al., 2009).

O crescimento inicial das plantas de capim-pé-de-galinha é lento, com pequeno acúmulo de massa até 45 dias após a emergência (TAKANO et al., 2016). Mesmo assim, a capacidade competitiva dessa planta daninha sobre o crescimento e a produtividade das culturas é bastante significativa. Em algodão, na densidade de 5 plantas m^{-2}, a redução da produtividade pode chegar a 27% (MA et al., 2015). Já

na cultura da soja, a presença de capim-pé-de-galinha resulta em redução na produtividade de até 89% (dados dos autores).

Somada à interferência causada pela presença de capim-pé-de-galinha, a importância dessa espécie aumenta com a existência de populações resistentes a herbicidas (HEAP, 2020). O primeiro caso de resistência desta espécie a herbicidas ocorreu em 1973, nos Estados Unidos da América, para herbicidas inibidores da polimerização de tubulina. Em 1990, a Malásia relatava a resistência ao glifosato. No Brasil, o relato da resistência ao glifosato ocorreu em 2016, sendo que, no ano seguinte, foi relatada a resistência múltipla ao glifosato e a inibidores da ACCase (haloxyfop e fenoxaprop) (HEAP, 2020).

Para o herbicida glifosato, a resistência nesta espécie decorre de uma ou duas mutações no gene *EPSPS*. Uma delas, a que ocorre no Brasil, é resultado de uma única alteração do aminoácido Prolina por Serina, na posição 106 do gene (P106S) (TAKANO et al., 2019). No biótipo da Malásia, ocorreu mutação dupla (conhecida como TIPS), sendo a soma da alteração P106S mais a troca de um Treonina por um Isoleucina na posição 102 (T102I). Ainda para o glifosato, existem relatos de biótipos fora do Brasil com superexpressão do gene *EPSPS*, o que pode resultar em maior conteúdo da enzima (CHEN et al., 2020).

É importante salientar que a mutação P106S confere baixos níveis de resistência às plantas de capim-pé-de-galinha, enquanto a mutação do tipo TIPS leva a elevados níveis de resistência. Por outro lado, biótipos com a mutação P106S sofrem baixo custo adaptativo (*fitness*), ou seja, desenvolvem-se de maneira semelhante às plantas suscetíveis na ausência de glifosato, enquanto plantas com mutações TIPS sofrem elevada penalidade em seu desenvolvimento (informação dos autores). Também tem-se observado que plantas com resistência múltipla ao glifosato e inibidores da ACCase apresentam menor desenvolvimento que plantas com a mutação P106S isolada (Figura 1).

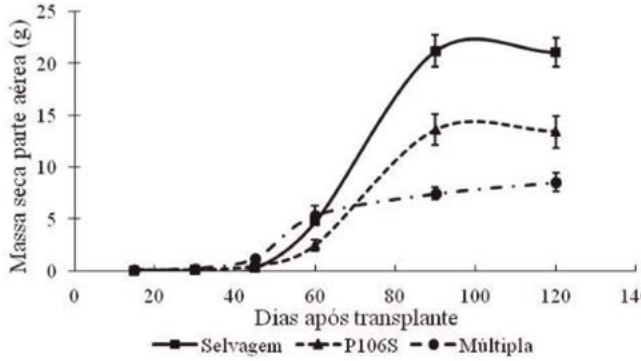


Figura 1: Crescimento de biótipos de capim-pé-de-galinha selvagem (quadrados), resistentes ao glifosato por mutação P106D (triângulo) e com resistência múltipla a glifosato e inibidores da ACCase (esferas).
Fonte: Os autores

Como alternativas de controle químico do capim-pé-de-galinha existem diferentes herbicidas e mecanismos de ação recomendados. Em pré-emergência, os herbicidas sulfentrazone, pendimethalin, s-metolachlor e trifluralin apresentam controle superior a 80%, por até aos 60 dias após a aplicação. Em pós-emergência, os herbicidas paraquat e paraquat + diuron são eficientes. O herbicida amônio-glufosinato não é uma solução eficaz, mesmo com plantas apresentando apenas um perfilho (TAKANO et al., 2018).

Para a cultura da soja, em pós-emergência, são eficazes os tratamentos com clethodim, haloxyfop e quizalofop, desde que não seja em área com biótipos resistentes aos inibidores da ACCase. Por outro lado, os herbicidas fluazifop, fenoxaprop e sethoxydim não são eficazes em plantas com a partir de quatro perfilhos. Em relação a herbicidas seletivos para o milho, para plantas de capim-pé-de-galinha com 1 a 4 perfilhos, são poucos os herbicidas eficazes, se aplicados isolados. O ideal é que se controlem plantas pequenas, com, no máximo, um perfilho, o que pode ser obtido pelo uso de atrazina + mesotrione, atrazina + tembotrione ou atrazina + mesotrione + nicosulfuron (TAKANO et al., 2018).

6 BUVA

A buva pertence à família Asteraceae, considerada uma das principais plantas daninhas em importantes cultivos brasileiros. No Brasil, o complexo buva é formado por três espécies que ocorrem mais frequentemente nas lavouras: *Conyza bonariensis*, *Conyza canadensis* e *Conyza sumatrensis*. A identificação das espécies de buva no campo é dificultada pela grande similaridade entre as espécies. Contudo, algumas características morfológicas (Quadro 1) permitem a diferenciação das espécies (OLIVELLA et al., 2016), embora a forma mais precisa seja utilizando ferramentas moleculares.

Estrutura	**C. bonariensis**	**C. sumatrensis**	**C. canadensis**
Folhas	Basais com margens serradas e longas. As superiores com margens inteiras quase lineares e menores.	As basais mais longas e progressivamente menores em direção ao ápice.	Margens dentadas, finas.
Caule	Folhoso em toda a extensão.	Folhoso em toda a extensão.	Folhoso somente no ápice, sem ramificações.
Inflorescência	Panícula espiciforme.	Panícula piramidal.	Panícula ampla e numerosos capítulos.
Capítulos	Muitas flores. Com invólucro reto.	Muitas flores. Com invólucro com forma de campana, não reto.	Poucas flores. Com invólucro com forma de campana, não reto.

Fonte: Olivella et al. (2016).

Embora existam essas diferenças entre as espécies, ambas são plantas anuais, herbáceas, eretas, com folhas e caules pubescentes, podendo chegar a 2 m de altura. Trata-se de uma planta-daninha com grande capacidade reprodutiva por meio de sementes. Cada planta é capaz de produzir mais de 200 mil sementes,

podendo chegar a 600 mil (KASPARY et al., 2017), que são dispersadas pelo vento devido ao pequeno tamanho e à presença de papus. A dispersão a partir da planta-mãe pode atingir mais de 500 m, embora 99% das sementes sejam dispersas em distâncias de até 100 m (DAUER et al., 2007).

As sementes apresentam pouca ou nenhuma dormência. Dessa forma, a manutenção do banco de sementes do solo é prejudicada, uma vez que a germinação ocorre prontamente quando as condições de temperatura, luminosidade e umidade são atendidas (WU et al., 2007; LAZAROTO et al., 2008). Dessa forma, embora sejam plantas daninhas anuais e facultativas de inverno, a emergência pode ocorrer durante o outono e a primavera. Sendo assim, a germinação dessas espécies ocorre no Brasil ao longo do ano, de acordo com a região, em função da ocorrência de temperatura e de umidade adequadas (TOZZI; VAN ACKER, 2014).

A temperatura ótima para que ocorra germinação de buva é em torno de 20 a 30°C. Além disso, a espécie é fotoblástica positiva, ou seja, a germinação ocorre somente na presença de luz, em sementes expostas na superfície do solo (VIDAL et al., 2007). Essa característica explica, pelo menos em parte, o aumento da ocorrência de buva com a adoção de um sistema de plantio direto mal conduzido, com cobertura de solo deficiente. Outras características que favorecem a germinação dessas espécies é a presença de umidade adequada no solo, uma vez que tanto a falta de umidade quanto o excesso (encharcamento) prejudicam o processo e o pH do solo, que em valores acima de 6 favorecem o processo germinativo (YAMASHITA; GUIMARÃES, 2011).

Além do sistema de plantio direto, o uso contínuo do glifosato e a introdução da soja resistente a este herbicida levaram à seleção de biótipos resistentes (LAMEGO et al., 2008), o que facilitou a dispersão das espécies para várias regiões do Brasil. Inicialmente, a ocorrência de buva era restrita à região Sul do País. Atualmente, estima-se que a buva infeste área de aproximadamente 14 milhões de hectares no Brasil, o que corresponde acerca de 40% da área total cultivada com soja (ADEGAS et al., 2017).

Todas as espécies de buva comuns no Brasil apresentam populações resistentes ao glifosato. *C. bonariensis* e *C. sumatrensis* apresentam populações com resistência múltipla aos inibidores da EPSPS e da ALS. Também ocorre, de forma localizada, no Paraná, *C. sumatrensis*, com resistência a cinco mecanismos de ação:

inibidores da EPSPS, PPO, FSII, FSI e auxinas sintéticas (HEAP, 2020). Dessa forma, as sementes são muito mais que propágulos de buva: elas são a resistência sendo disseminada pelas lavouras, o que reduz as opções de herbicidas que podem ser utilizados em seu manejo.

Em áreas com alta infestação de buva, a redução da produtividade de soja pode chegar a 80%. Em situações com densidade entre 16 e 18 plantas m^{-2}, a redução na produtividade pode chegar a 48% (GAZZIERO et al., 2010). Dependendo da cultivar de soja, a redução da produtividade causada por uma única planta de buva por m^2 pode chegar a 26% (AGOSTINETTO et al., 2017). Há variação na redução da produtividade de soja entre as espécies. Uma planta m^{-2} de *C. bonariensis* gera redução 20% no rendimento de grãos de soja, ao passo que, para *C. sumatrensis*, essa mesma redução na produtividade ocorre quando a infestação é de quatro plantas m^{-2} (PONSA; PICAPIETRA, 2015).

Além da redução de produtividade, os custos de controle aumentam quando há buva resistente nas lavouras, podendo variar de R$ 50,00 a R$ 120,00 por hectare (ADEGAS et al., 2017). Além da competição e do aumento do custo de controle, as plantas de buva também podem servir como hospedeiras alternativas de importantes pragas da cultura da soja, incluindo os percevejos e as lagartas (DALAZEN et al., 2016).

O manejo de buva exige a adoção de medidas integradas de controle. Por ser uma espécie fotoblástica positiva, a presença de palhada na superfície do solo, produzida via plantas de cobertura, é uma das principais práticas para se prevenir e manejar buva nas lavouras. Em áreas com boa cobertura de palhada, a ocorrência de buva diminui consideravelmente. Em estudo realizado no RS, observou-se que, em condições de pousio, a densidade de buva foi de 157 plantas m^{-2}. Contudo, nos tratamentos com plantas de cobertura de inverno, a população de buva reduziu-se consideravelmente. O melhor resultado foi obtido com o cultivo de ervilhaca, que reduziu a infestação de buva a apenas uma planta m^{-2}. Em seguida, azevém, aveia-preta e trigo reduziram a densidade de buva para seis, nove e 10 plantas m^{-2}, respectivamente (LAMEGO et al., 2013). Além da redução da densidade, Gazziero et al. (2012) relataram que o tamanho das plantas de buva é reduzido quando a área é cultivada com aveia, em comparação ao milho solteiro na segunda safra, que resultou em melhor eficiência dos herbicidas utilizados posteriormente.

Em regiões mais quentes, outras espécies podem ser utilizadas para a supressão de buva, incluindo milheto e espécies de braquiária. Esta última pode ser consorciada com milho, servindo como cobertura do solo durante e após o cultivo do milho, reduzindo a infestação da planta daninha. A utilização de braquiária (*Urochloa ruziziensis*), em consórcio com o milho, reduziu a densidade de buva de 15 plantas m^{-2} em milho solteiro para apenas uma planta m^{-2} no sistema consorciado (MATEUS et al., 2010).

O uso de rolo-faca ou qualquer outro equipamento que deite a palhada, aumentando o sombreamento do solo, reduz a germinação de buva e de outras espécies (ARAÚJO; RODRIGUES, 2000). Além do efeito físico gerado pelo sombreamento, também há o efeito químico, via liberação de substâncias aleloquímicas, que inibem a germinação e o desenvolvimento inicial de plantas de buva. Um desses compostos é o ácido aconítico, presente em culturas gramíneas, como aveia, trigo e braquiária (VOLL et al., 2013).

Em relação ao controle químico de buva, o recomendado é que o mesmo seja realizado em estádios iniciais de desenvolvimento das plantas. Durante a estação fria, em cereais de inverno, como a aveia e o trigo, os herbicidas metsulfuron-methyl (inibidor da ALS) e o 2,4-D (mimetizador de auxina) apresentam bom controle de buva, devendo ser aplicados durante o perfilhamento das culturas (DALAZEN et al., 2015a). Ainda, em trigo, podem ser utilizados o saflufenacil (inibidor da PROTOX), a bentazona (inibidor de FSII) e o iodosulfuron-methyl (inibidor da ALS), em plantas de buva em estádio de 2 a 4 folhas. Contudo, essa recomendação não é válida para lavouras com ocorrência de biótipos de buva resistentes aos inibidores da ALS e auxinas sintéticas (HEAP, 2020). Antecedendo a colheita do trigo, dessecações com herbicidas, como amônio-glufosinato (inibidor da GS), têm apresentado bom controle de buva. Contudo, a eficiência desse herbicida é satisfatória em plantas em estádio inicial de desenvolvimento, com até 10 cm de estatura no momento da aplicação (OLIVEIRA NETO et al., 2010).

Para controle de buva precedente à semeadura de soja, a dessecação de buva pode ser realizada utilizando-se da mistura de glifosato (inibidor da EPSPS) com outros herbicidas sistêmicos, incluindo inibidores da ALS (ex.: clorimurom-methyl), auxinas sintéticas (ex.: 2,4-D) e saflufenacil, que mesmo sendo um inibidor da PROTOX, apresenta certa sistemicidade que lhe permite a mistura com glifosato

(ASHIGH; HALL, 2010; DALAZEN et al., 2015b). Em áreas com alta infestação, principalmente com plantas de buva em estádio mais avançado de crescimento (> 15 cm), muitas vezes torna-se necessária a realização de dessecação sequencial, que é realizada próxima ou no momento da semeadura, e ocorre, em média, 14 dias depois da primeira dessecação. A aplicação sequencial pode ser realizada com herbicidas de contato, como inibidores de GS (ex.: amônio-glufosinato) e inibidores de FSI (ex.: diquat e paraquat). Deve-se ressaltar que, em casos de ocorrência conjunta de buva e poáceas resistentes ao glyphosate, como capim-pé-de-galinha e capim-amargoso, a mistura de 2,4-D com inibidores da ACCase deve ser evitada devido à ocorrência de antagonismo.

Outra ferramenta importante é a utilização de pré-emergentes ou herbicidas residuais, os quais podem ser adicionados à dessecação sequencial, ou aplicados logo após a semeadura, no sistema "plante e aplique". Entre os mecanismos de ação recomendados para o manejo de buva em pré-emergência, podem ser citados os inibidores da PPO (ex.: sulfentrazone e flumioxazina), os inibidores da ALS (ex.: diclosulam e chlorimuron-ethyl), os inibidores de FSII (ex.: metribuzin e cyanazina), os inibidores de ácidos graxos de cadeia muito longa (ex.: S-metolachlor e alachor), os inibidores da polimerização de tubulina (ex.: trifluralina e pendimentalina), inibidores da biossíntese de carotenoides (ex.: clomazone), além de outras opções de mecanismos de ação e de ingredientes ativos.

Nos últimos anos, as empresas de agroquímicos têm lançado no mercado misturas formuladas de pré-emergentes, com o objetivo de melhorar a eficiência e de ampliar o espectro de ação. São exemplos de misturas recomendadas para o controle de buva em pré-emergência os herbicidas sulfentrazone + diurom (PROTOX + FSII), imazethapyr + flumioxazina (ALS + PROTOX), imazapique + imazapir (ALS + ALS). É importante ressaltar que, para a utilização segura de pré-emergentes, a recomendação de dose deve considerar as características do solo e as condições ambientais.

Após o estabelecimento e a emergência da cultura da soja, as opções restringem-se, principalmente, a alguns inibidores da ALS (ex.: cloransulan, chlorimuron-ethyl e imazethapyr). Contudo, a eficiência é limitada a estádios iniciais de desenvolvimento da buva. Além disso, por meio de biotecnologia, algumas cultivares toleram os herbicidas inibidores da GS (ex.: amônio-glufosinato) e podem ser utiliza-

das como estratégia de manejo de buva. Para os próximos anos, outras tecnologias, como a Enlist e a Xtend, permitirão o uso em pós-emergência da soja de 2,4-D e de dicamba, respectivamente, auxiliando no manejo de buva nas lavouras.

Além das medidas já citadas, outras ferramentas são importantes no sentido de reduzir as infestações de buva. A adoção de um sistema de rotação de culturas permite, além do aporte de palhada na superfície do solo, a utilização de herbicidas diferentes aos utilizados na soja. Na cultura do milho, a utilização de atrazina (inibidor de FSII) é seletiva para a cultura e apresenta efeito sobre a buva, podendo ser utilizada isoladamente ou em mistura com inibidores da biossíntese de carotenoides (ex.: mesotrione e tembotrione). Esses herbicidas não são seletivos para a cultura da soja e, portanto, para incluí-los no sistema faz-se necessária a adoção da rotação ou da sucessão de culturas com o milho.

Por ser uma espécie altamente prolífera e de fácil dispersão pelo vento, boas práticas agrícolas, como a eliminação de plantas de buva em áreas não cultivadas, como beira de estradas e de cercas, são importantes no sentido de reduzir as infestações de buva nas lavouras. Outras medidas incluem a limpeza de maquinários, principalmente colhedoras, ao transitar entre áreas infestadas e não infestadas. Quando possível, o ideal seria realizar a colheita das áreas infestadas por último, para evitar a introdução de sementes em áreas não infestadas.

O manejo de buva exige planejamento e ação contínua durante o ano todo. O problema não deve ser visto e lembrado apenas na safra ou no momento da dessecação que antecede à semeadura da cultura principal. O manejo químico, de maneira isolada, não tem sido eficiente. Faz-se necessária a adoção do manejo integrado de plantas daninhas (MIPD). Nesse contexto, práticas preventivas, principalmente o uso de culturas de cobertura, que reduzam a germinação e a emergência de buva, são fundamentais para que essa espécie de planta daninha não seja um problema nos sistemas agrícolas.

7 CARURU

As plantas de caruru, pertencentes ao gênero *Amaranthus*, são encontradas em regiões tropicais e subtropicais do mundo. No Brasil, a espécie *Amaranthus*

hybridus, também chamado de caruru-roxo, é encontrada em todos os Estados. Trata-se de uma planta anual, monoica, herbácea, com caule ereto e que apresenta grande variedades de cores, desde o verde até ao vermelho-púrpura. Suas folhas são simples lanceoladas, em forma helicoidal, com inflorescência contendo, tanto flores masculinas, quanto femininas, e com maturação em plantas de 20 cm até 2 m de altura (KISSMANN; GROTH, 1997).

Plantas de *A. hybridus* apresentam ciclo fotossintético C4, ou seja, apresentam grande capacidade de competição por água, luz e nutrientes, quando comparadas com plantas de ciclo C3, como, por exemplo, soja e feijão (CARVALHO et al., 2015). Além disso, são plantas capazes de produzir grandes quantidades de sementes (cerca de 600 mil sementes por planta), que podem ser disseminadas por máquinas agrícolas, canais de irrigação, animais, entre outros, o que faz desta planta uma espécie bastante agressiva.

Existe grande semelhança entre as plantas de *A. hybridus e A. palmeri* (caruru-palmeri), o que dificulta sua correta identificação no campo e, consequentemente, o manejo. A maneira mais eficaz de identificação das espécies ocorre no período de florescimento, visto que a espécie *A. palmeri* trata-se de uma planta dioica, com flores masculinas e femininas em plantas distintas, enquanto *A. hybridus* é monoica, contendo ambos os sexos na mesma planta (PENCKOWSKI et al., 2020).

Hoje, a preocupação com a espécie está ligada ao aparecimento de biótipos de *Amaranthus* resistentes a herbicidas. No mundo, são conhecidos diversos casos de plantas do gênero *Amaranthus* resistentes a diversos mecanismos de ação, inclusive de resistência múltipla (HEAP, 2020). No caso do *A. hybridus*, existem relatos de resistência a herbicidas inibidores da EPSPs, ALS, PPO, FSII e auxinas (HEAP, 2020), sendo que a resistência múltipla desse biótipo, aos herbicidas glyphosate, 2,4-D e dicamba, foi encontrada recentemente na Argentina (DELLAFERRERA et al., 2018).

No Brasil, até então, apenas a espécie *Amaranthus palmeri* havia sido identificada como resistente (EPSPs e ALS); entretanto, no ano de 2018, foi relatada a presença de biótipo de *A. hybridus* resistente ao herbicida glyphosate, no Rio Grande do Sul (OLIVEIRA et al., 2019); e, mais recentemente, um caso de resistência múltipla aos herbicidas inibidores da EPSPs e ALS, no Paraná (PENCKOWSKI; MASCHIETTO, 2019).

A presença de biótipos de *A. hybridus* resistente nas lavouras brasileiras acaba dificultando cada vez mais o manejo, pois torna ineficaz a aplicação de certos herbicidas, como, por exemplo, o glifosato, fazendo-se necessária a utilização de outros produtos, podendo aumentar os custos com controle de plantas daninhas. Além disso, o impacto na produtividade de áreas com a presença dessa planta é bastante elevado, podendo reduzir em até 80% a produção de soja e milho, e até inviabilizar a colheita (PENCKOWSKI et al., 2020).

É importante ressaltar que, além da plasticidade fenotípica de *A. hybridus*, esta espécie pode ter hibridação natural com outras espécies de *Amaranthus* (GAINES et al., 2012), ou seja, pode haver a transferência da resistência a herbicidas desta planta para outras espécies de caruru.

Já a espécie de caruru-palmeri (*Amaranthus palmeri*) foi encontrada no Brasil, inicialmente no ano de 2015, em áreas de plantio de algodão, no Estado de Mato Grosso (ANDRADE JUNIOR et al., 2015). Especula-se que sua introdução no Brasil tenha sido através da importação de colhedoras usadas na colheita de grãos e de algodão fora do País e que estariam contaminadas. Segundo estimativa do Indea/MT, a área infestada com caruru-palmeri no Brasil, atualmente, é de 11 a 12 mil hectares, valor este que não se alterou muito desde sua identificação, ou seja, sua infestação é considerada sob controle.

A espécie é dioica, ou seja, em uma população, parte das plantas terão somente flores femininas (plantas "fêmea") e a outra parte, somente flores masculinas (plantas "macho"). Essa é uma característica que facilita a identificação do caruru-palmeri, uma vez que todas as outras espécies de caruru já identificadas no Brasil têm flores masculinas e femininas separadas; porém, na mesma planta, sendo classificadas como monoicas. As sementes são produzidas somente nas plantas com flores femininas; porém, as plantas femininas podem produzir sementes mesmo sem a ocorrência de polinização, por partenocarpia. Este fato facilita a invasão desta espécie em novos ambientes (LEGLEITER; JOHNSON, 2013). No geral, a espécie também pode ser identificada pela presença de pecíolo de comprimento maior que o limbo foliar.

A espécie de *A. palmeri* é uma de planta daninha oportunista e competitiva por excelência, com alta fecundidade, germinação e crescimento rápidos, e uma capacidade fenotípica e plasticidade fenológica que permitem a produção de semen-

tes em condições diferentes. Estudos realizados nos Estados Unidos mostram que *A. palmeri* pode produzir cerca de 1.000.000 de sementes por planta, e as mesmas podem levar de 3 a 8 dias para germinar (WARD et al., 2013).

O caruru-palmeri é originário de regiões áridas do centro-sul dos Estados Unidos da América do Norte (EUA) e norte do México, e está presente em vários países do mundo. Nos últimos anos, esta espécie tornou-se a principal planta daninha do algodoeiro nos EUA, em função de suas características biológicas e da resistência a herbicidas de diferentes mecanismos de ação (LEGLEITER; JOHNSON, 2013).

Nos Estados Unidos da América; há relatos de populações de caruru-palmeri que foram selecionadas como resistentes a, pelo menos, um dos herbicidas pertencentes a cinco mecanismos de ação: inibidores da ALS, inibidores da EPSPS, inibidores da HPPD, inibidores da polimerização de tubulina e inibidores do fotossistema II (WARD et al., 2013).

O manejo dessas populações torna-se ainda mais complexo, sobretudo para aquelas com mecanismos de resistência múltipla, a qual já foi relatada para dois ou três desses mecanismos de ação: ALS/EPSPS; ALS/EPSPS/FSII e ALS/FSII/HPPD (BECKIE; TARDIF, 2012; WARD et al., 2013; HEAP, 2020). Além das fronteiras dos EUA, já foram relatados biótipos de caruru-palmeri com resistência a ALS em Israel (HEAP, 2020) e Argentina (MORICHETTI, 2013). No Brasil, a planta já foi pesquisada com relação à resistência a herbicidas, e trabalhos publicados comprovam que as populações estudadas são resistentes ao glifosato (inibidor da EPSPS) e a inibidores da ALS (CARVALHO et al., 2015).

O impacto da falta de controle de *A. palmeri*, seja por falta de manejo, seja pelo fato de as plantas serem resistentes a algum tipo de herbicida, em qualquer tipo de cultura, pode ser devastador. Essas perdas de produtividade podem chegar a 91% na cultura do milho, 65% na de algodão, 68% na de sorgo, 79% na de soja, 68% na de amendoim e 94% na de batata-doce (WARD et al., 2013).

Vários fatores podem contribuir para que *A. palmeri* se torne uma das principais plantas daninhas dos sistemas de cultivo brasileiro. Alguns destes fatores estão associados com as práticas de manejo de plantas daninhas; por exemplo, no plantio direto, que preza pelo não revolvimento do solo e favorece *A. palmeri* com suas sementes pequenas que germinam facilmente na superfície da palhada. Outro

fator que pode favorecer o aumento da infestação é a grande dependência por herbicidas no sistema de produção atual, especialmente a dependência de glifosato em culturas resistentes, o que contribui para um ambiente favorável para esta planta daninha, que tem populações diversas geneticamente, além de um grande potencial para a evolução rápida da resistência (WARD et al., 2013).

Mais estudos sobre estratégias, a longo prazo, fazem-se necessários, principalmente visando a evitar que *A. palmeri* se torne resistente a mais mecanismos de ação herbicidas. Algumas alternativas de controle vêm sendo utilizadas com sucesso no manejo de *A. palmeri* resistente ao glifosato. Dentre elas, destaca-se a aplicação de herbicidas pós-emergentes inibidores da PROTOX, como fomesafen, lactofen, saflufenacil ou flumiclorac. Além disso, os futuros *traits* de culturas resistentes a herbicidas não seletivos (amônio-glufosinato, 2,4-D, dicamba e tembotrione), que estão sendo desenvolvidos, proporcionarão maior leque de opções para o manejo do caruru-palmeri.

Ressalta-se que, para o sucesso do manejo químico de caruru-palmeri através da utilização de herbicidas pós-emergentes, os mesmos devem ser aplicados em estádios iniciais de desenvolvimento da planta daninha, e na dose apropriada. Em relação a herbicidas pré-emergentes, o manejo pode ser feito com o uso dos herbicidas S-metolachlor, sulfentrazone, flumioxazin e metribuzin. A utilização de herbicidas pré-emergentes tornou-se fundamental para que o manejo químico proporcione boa eficácia de controle de plantas daninhas, além de reduzir as perdas de produção decorrentes da matocompetição no início do ciclo das culturas. Um fator importante a ser observado na aplicação dos herbicidas, em condições de pré-emergência, são os atributos do solo, como teor de matéria orgânica e argila, bem como a condição hídrica do solo no momento da aplicação, ou seja, se a aplicação está sendo realizada em época úmida, seca ou de transição.

Além disso, alternativas não químicas também podem ser usadas, como é o caso da utilização da palhada pelo sistema de plantio direto, além do consórcio entre culturas, e a rotação de culturas com adubos verdes, que visam a reduzir a pressão causada pelo banco de sementes existente na área, uma vez que dificultam a emergência de inúmeras espécies e inviabilizam a germinação ao longo do tempo. Em resumo, o controle de caruru-palmeri é recomendado principalmente em fases iniciais de crescimento da planta daninha, dado seu alto potencial competitivo com

as culturas e maior suscetibilidade aos herbicidas, evitando-se assim as perdas por matocompetição precoce. O controle da espécie também se faz ao longo do ciclo da cultura, a fim de evitar escapes e, consequentemente, a produção de sementes pela planta daninha. O desenvolvimento de práticas de manejo que integrem o uso sustentável de herbicidas, além de implementação adequada de métodos não químicos para sistemas de cultivos afetados pelo caruru-palmeri devem, portanto, ser prioridade, visando ao sucesso de manejo, tanto na safra atual, como nas subsequentes.

REFERÊNCIAS

ADEGAS, F. S. et al. **Impacto econômico da resistência de plantas daninhas a herbicidas no Brasil**. Circular Técnica 132, EMBRAPA : Londrina - PR. 2017.

ADEGAS, F. S. et al. Alternativas de controle químico de Digitaria insularis resistente ao herbicida glyphosate. In: XXVII CONGRESSO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS. Ribeirão Preto, 2010. **Resumos expandidos**... Ribeirão Preto: SBCPD, 2010. p.758-760.

AGOSTINETTO, D. et al. Soybean yield loss and economic thresholds due to glyphosate resistant hairy fleabane interference. **Arquivos do Instituto Biológico**, v. 84, p. 1-8, 2017.

AGOSTINETTO, D. et al. Período crítico de competição de plantas daninhas com trigo. **Planta Daninha**, v. 26, p. 271-278, 2008.

AGROFIT. **Sistemas de agrotóxicos fitossanitários**. Disponível em: <http://extranet.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons>. Acesso em: 20 nov. 2019.

AHRENS, H. et al. 4-Hydroxyphenylpyruvate dioxygenase inhibitors in combination with safeners: solutions for modern and sustainable agriculture. **Angewandte Chemie- International Edition**, v. 52, p. 9.388-9.398, 2013.

ANDRADE, D. N. **Alternativas herbicidas para o controle em pré-emergência do capim-amargoso**. 2019. 44 p. Dissertação (Mestrado). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Rio Verde, GO, 2019.

ANDRADE JR., E. J. et al. Controle residual de capim amargoso na soja cultivada em região de cerrado. **Científica Multidisciplinary Journal**, v. 5, p. 48-55. 2018.

ANDRADE JUNIOR, E. R. et al. **Primeiro relato de *Amaranthus palmeri* no Brasil em áreas agrícolas no Estado do Mato Grosso**. Circular Técnica 19, Mato Grosso: IMAmt, 2015.

ARAÚJO, A. G.; RODRIGUES, B. N. Manejo mecânico e químico da aveia preta e sua influência sobre a taxa de decomposição e o controle de plantas daninhas em semeadura direta de milho. **Planta Daninha**, v. 18, p. 151-160, 2000.

ASHIGH, J. J.; HALL, C. Bases for interactions between saflufenacil and glyphosate in plants. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 58, n. 12, p. 7335-7343, 2010.

BARROSO, A. A. M. **Caracterização genética e foliar de capim-amargoso resistente ao herbicida glyphosate e eficácia de seu controle com associação de herbicidas**. 2014. 96 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) –Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014a.

BARROSO, A. A. M. et al . Interação entre herbicidas inibidores da accase e diferentes formulações de glyphosate no controle de capim-amargoso. **Planta Daninha**, v. 32, p. 619-627, 2014b.

BARROSO, A. A. M. et al. Competição entre a cultura da soja e a planta daninha *Chloris polydactyla*. **Cerrado agrociências,** v. 5, p. 82-90, 2014c.

BECKIE, H.; TARDIF. F.J. Herbicide cross resistance in weeds. **Crop Protection**, v. 35, p. 15-28, 2012.

BENEDETTI, J. G. R. et al. Período anterior à interferência de plantas daninhas em soja transgênica. **Scientia Agrária**, v. 10, p. 289-295, 2009.

BIANCHI, M. A. et al. Estratégias para reduzir a interferência de *Lolium multiflorum* na cultura do trigo. **Informativo – Boletim Técnico CCGL Tec**, n. 52, 2017.

BIANCHI, M. A. Controle químico de plantas daninhas na cultura do trigo. **Informativo – Boletim Técnico CCGL Tec**, v. 5, n. 22, 2015.

BIANCHI, M. A. Manejo e controle de azevém resistente ao glifosato. **Informativo – Boletim Técnico CCGL Tec**, n. 1, 2008.

BRIGHENTI, A. et al. *Chloris polydactyla* (L.) Sw., a perennial Poaceae weed: Emergence, seed production, and its management in Brazil. **Weed Biology and Management**. v. 7, p. 84–88, 2007.

BRUNHARO, C. A. et al. Confirmation and mechanism of glyphosate resistance in tall windmill grass (*Chloris elata*) from Brazil. **Pest Management Science**, v. 72, 2016.

CANTO-DOROW, T. S. *Digitaria* Heister ex Haller. In: WANDERLEY, M. G. L.; SHEPHERD, G. J.; GIULIETTI, A. M. (Eds.). ***Flora fanerogâmica do Estado de São Paulo***. São Paulo: HUCITEC, 2001. p.143-150.

CARVALHO, S. J. P. et al. Detection of Glyphosate-Resistant Palmer Amaranth (*Amaranthus palmeri*) in Agricultural Areas of Mato Grosso, Brazil. **Planta Daninha**, v. 33, p. 579-586, 2015.

CARVALHO L. B. et al. Pool of resistance mechanisms to glyphosate *Digitaria insularis*. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 60, p. 615–622, 2012.

CARVALHO, S. J. P. et al. Crescimento, desenvolvimento e produção de sementes da planta capim-branco (*Chloris polydactyla*). **Planta Daninha**, v. 23, p. 603-609, 2005.

CARVALHO, A.T.; MOOJEN, E. L.; JACQUES, R. J. S. Sobressemeadura de aveia preta (*Avena strigosa*) + azevém anual (*Lolium multiflorum*) em campo natural com ou sem o uso de herbicidas. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 8, p. 59-66, 2002.

CHEN, J. et al. Glyphoaste resistance in *Eleusine indica*: EPSPS overexpression and P106A mutation evolved in the same individuals. **Pesticide biochemistry and Physiology**. In press, 2020.

CHRISTOFFOLETI, P. J. et al. Simulação de sistemas de manejo químico para *Digitaria insularis* resistente ao glifosato na cultura da soja RR: Enfoque em residuais. In: XXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE CIENCIAS DE PLANTAS DANINHAS 2012. **Anais**... Campo Grande: SBCPD, 2012. p. 222-227.

CONSTANTIN, J. et al. Sistemas de manejo plantas daninhas no desenvolvimento e produtividade da soja. **Bragantia**, v. 68, p. 125 -135, 2009.

DALAZEN, G. et al. Hairy fleabane as a source of major insect pests of soybean. **Planta Daninha**, v. 34, p. 403-409, 2016.

DALAZEN, G. et al. Herbicidas de uso potencial no controle de buva e sua seletividade sobre aveia e azevém. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 4, p. 792-799, 2015a.

DALAZEN, G. et al. Sinergismo na combinação de glifosato e saflufenacil para o controle de buva. Pesquisa Agropecuária Tropical, v. 45, n. 2, p. 249-256, 2015b.

DAUER, J. T. et al. Temporal and spatial dynamics of long-distance *Conyza canadensis* seed dispersal. **Journal of Applied Ecology**, v. 44, p. 105-114, 2007.

DELLAFERRERA, I. et al. First Report of *Amaranthus hybridus* with Multiple Resistance to 2,4-D, Dicamba, and Glyphosate. **Agronomy**, v. 8, n. 8,140 p., 2018.

DREHMER, M. H. et al. Eficiência de herbicidas aplicados em pré-emergência para

o controle de *Digitaria insularis* na cultura do feijão. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 14, p. 148-154. 2015.

FERREIRA, A. G.; ÁQUILA, M. E. A. Alelopatia: uma área emergente da ecofisiologia. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v.12, edição especial, p.175-204, 2000.

FLECK, N. G. Competição de azevém (*Lolium multiflorum*) com duas cultivares de cultivares de trigo. **Planta Daninha**, v. 3, p. 61-67, 1980.

FRANCHINI, C. J. et al. Desempenho da soja em consequência de manejo de pastagem, época de dessecação e adubação nitrogenada. **Pesq. agropec. bras**., v. 50, n. 12, p. 1131-1138, 2015.

GAINES, T. A. et al. Interspecific hybridization transfers a previously unknown glyphosate resistance mechanism in *Amaranthus* species. **Evolutionary Applications**, v. 5, n. 1, p. 29 - 38, 2012.

GALEANO, E. et al. EPSPS variability, gene expression., and enzymatic activity in glyphosate-resistant biotypes of *Digitaria insularis*. **Genetics and molecular research**, v. 15, p. 1-15, 2016.

GAZZIERO, D. L. P. et al. Manejo integrado de plantas daninhas. In: VELINI, E. D. et al. **Glyphosate uso sustentável**. Botucatu: FEPAF, 2012. p. 185-202.

GAZZIERO, D. L. P. et al. **Interferência da buva em áreas cultivadas com soja**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS, Ribeirão Preto, 2010.

GEMELLI, A. et al. Estratégias para o controle de capim-amargoso (*Digitaria insularis*) resistente ao glyphosate, desde a dessecação de manejo até a pós-emergência da soja RR. **Informe Técnico PGA-UEM**, v. 2, n. 2, p. 1-5, 2013.

GEMELLI, A. et al. Aspectos da biologia de *Digitaria insularis* resistente ao glyphosate

e implicações para o seu controle. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 1, p. 231-240, 2012.

GILO, E. G. et al. Alternatives for chemical management of sourgrass. **Bioscience Journal**, v. 32, 2016.

HATZIOS, K. K.; BURGOS, N. Metabolism-based herbicide resistance: regulation by safeners. **Weed Science**, v. 52, p. 454-467, 2004.

HEAP, I. I**nternational Survey of Herbicide Resistant Weeds**. Disponível em: <http://www.weedscience.org/In.asp>. Acesso em: 03 mai. 2020.

ISMAIL, B. S. et al. Germination and seedling emergence of glyphosate-resistant and susceptible biotypes of goosegrass (*Eleusine indica* [L.] Gaertn.). **Weed Biol. Manage.**, v. 2, n. 4, p. 177-185, 2002.

JESCHKE, P. Progress of modern agricultural chemistry and future prospects. **Pest Management Science**, v. 72, p. 433-455, 2016.

KASPARY, T. E. et al. Growth, phenology, and seed viability between glyphosate-resistant and glyphosate-susceptible hairy fleabane. **Bragantia**, v. 76, p. 92-101, 2017.

KISSMANN, K. G.; GROTH, D. **Plantas infestantes e nocivas**. TOMO I. São Paulo: BASF, 1997.

LAMEGO, F. P. et al. Manejo de *Conyza bonariensis* resistente ao glyphosate: coberturas de inverno e herbicidas em pré-semeadura da soja. **Planta Daninha**, v. 31, p. 433-442, 2013.

LAMEGO, F. P.; VIDAL, R. A. Resistência ao glyphosate em biótipos de *Conyza bonariensis* e *Conyza canadensis* no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Planta Daninha**, v. 26, p. 467-471, 2008.

LAMP, C. A.; FORBES, S. J. CADE, J. W. (2001). **Grasses of temperate Australia – A field guide**. Inkata Press and CH Jerram & Associates Science Publishers (Revised Edition), 2001.

LAZAROTO, C. A. et al. Biologia e ecofisiologia de buva (*Conyza bonariensis e Conyza canadensis*). **Ciência Rural**, v. 38, p. 852-860, 2008.

LEGLEITER, T.; JOHNSON, B. Palmer Amaranth biology, identification and management. **Purdue Extension**, WS-51, 2013. Disponível em: <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/WS/WS-51-W. pdf>. Acesso: 24 jan. 2016.

LORENZI, H. et al. **Manual de identificação e controle de plantas daninhas**. 7.ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2014.

LORENZI, H. **Plantas daninhas do Brasil:** terrestres, aquáticas, parasitas e tóxicas. 4. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2008.

MA, X. et al. Goosegrass (*Eleusine indica*) density effects on cotton (*Gossypium hirsutum*). **Journal of Integrative Agriculture**, v. 14, n. 9, p. 1778–1785, 2015.

MACHADO, A. F. L. et al. Análise de crescimento de *Digitaria insularis* (L.) Fedde. Planta Daninha, v. 24, p. 641-647, 2006.

MALARDO, M. R. et al. Influence of the sowing depth and amount of sugarcane straw on the emergence of *Chloris polydactyla* and *Eleusine indica* and their control by herbicides applied pre-emergence. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, p. 1.187-1.200, 2017.

MATEUS, R. P. G. et al. Efeito da presença de *Brachiaria ruziziensis* em consórcio com milho (*Zea mays*) na supressão de plantas daninhas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS. **Anais**... v. 27, Ribeirão Preto, 2010.

MECHI, I. A. et al. Infestação de plantas daninhas de difícil controle em função de

anos de consórcio milho-braquiária. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 5, p. 49-54, 2018.

MELO, M. S. C. et al. Sourgrass resistant mechanism to the herbicide glyphosate. **Planta Daninha**, v. 37, 2019.

MELO, M. S. C. et al. Alternativas de controle químico do capim-amargoso resistente ao glyphosate, com herbicidas registrados para as culturas de milho e algodão. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 16, p. 206-215, 2017.

MELO, M. S. C. Alternativas para o controle de capim-amargoso (*Digitaria insularis*) resistente ao glyphosate. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 11, p. 195-203, 2012.

MORICHETTI, S. et al. Sobre la presencia de *Amaranthus palmeri* (Amaranthaceae) en Argentina. Bol. **Soc. Argentina Bot**., v. 48, p. 347-354, 2013.

NELSON, L. R. et al. Plant breeding for improved production in annual ryegrass: In: ROUQUETTE, F. M.; NELSON, L. R. **Ecology, production, and management of Lolium for forage in the USA**. Madison: Crop Science Society of America, v. 3, 1997. p. 1-14.

NOGUEIRA, P. et al. Intervalos de pré-semeadura da cultura do milho (Zea mays L.) após o cultivo do azevém (*Lolium multiflorum* lam.), sobre a emergência e o crescimento inicial. **Revista científica eletrônica de agronomia**, n. 28, p. 59-70, 2015.

OLIVEIRA, C. et al. População de caruru (*Amaranthus hybridus*) resistente ao glyphosate são encontradas no Rio Grande do Sul. **Sociedade Brasileira de Plantas Daninhas**. Boletim Informativo, v. 28, p. 24-25, 2019.

OLIVEIRA NETO, A. M. et al. Manejo de *Conyza bonariensis* com glyphosate + 2,4-D e amônio-glufosinate em função do estádio de desenvolvimento. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 9, n. 3, p. 73-80, 2010.

OLIVELLA, J. et al. Aspectos botânicos, ecofisiologicos e diferenciação de espécies do gênero *Conyza*. **HRAC-BR**, 2016.

PAULA, J. M. et al. Competição de trigo com azevém em função de épocas de aplicação e doses de nitrogênio. **Planta daninha**, v. 29, p. 557-563, 2011.

PENCKOWSKI, L. H. et al. Alerta! Cresce o número de lavouras com *Amaranthus hybridus* resistente ao herbicida glifosato no Sul do Brasil. **Revista FABC**, p. 11-14, 2020.

PENCKOWSKI, L. H.; MASCHIETTO, E. H. G. Suspeita de *Amaranthus hybridus* resistente ao herbicida glyphosate. **Revista FABC**, p. 20-21, 2019.

PEREIRA, A. V., et al. Agronomic behaviour of annual ryegrass (*Lolium multiflorum* L.) populations for winter cropping in Southeast Region of Brazil. **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 32, p. 567-572, 2008.

PETTER, F. A. et al. Use of cover crops as a tool in the management strategy of sourgrass. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 14, p. 200-209, 2015.

PITELLI, R. A.; DURIGAN, J. C. Ecologia das plantas daninhas no sistema plantio direto. In: ROSSELLO, R. D. **Siembra directa en el cono sur**. Montevideo: PROCISUR, 2001. p. 203-210.

PLACIDO, H. F. et al. Identificação e manejo de biótipos de Chloris polydactyla com resistência ou suscetibilidade de diferencial ao glyphosate no Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 15, 2016.

PLÁCIDO, H. F. et al.. Resistencia a glifosato em biótipos de *Chloris polydactyla* (L.) SW. recolectados em Brasil. **Revista Agropecuaria y Florestal**, v. 2, p. 19-22, 2013.

PONSA, J. C.; PICAPIETRA, G. Efecto de dos especies de rama negra (*Conyza bonariensis* L. Cronquist y *Conyza sumatrensis* Retz. E. Walker) en el rendimiento del culti-

vo de soja (*Glycine max* L. Merr.). In. XXII CONGRESSO DE LA ALAM - I . **Resumos**... Congreso de la ASACIM, 2015.

POWLES, S. B.; YU, Q. Evolution in action: plants resistant to herbicides. **Annual Review of Plant Biology**, v. 61, p. 317-347, 2010.

PYON, J. Y. et al. Biology of sourgrass and its competition with buffelgrass and guineagrass. **Weed Science**, v. 25, p. 171-174, 1977.

RAIMOND, R. T. et al. Altura de roçada afeta o controle de capim-amargoso perenizado. **Cultura Agronômica**, v. 28, n. 3, p. 254-267, 2019.

REINERT, C. S. A**spectos da biologia da *Digitaria insularis* resistente ao herbicida glyphosate**. 2013. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

ROSINGER, C. Herbicide safeners: an overview. **Julius-Kühn-Arch**, v. 443, p. 516–525, 2014.

SALVADOR, F. L. et al. Efeito da luz e da quebra de dormência na germinação de sementes de espécies de plantas daninhas. **Planta Daninha**, v. 25, p. 303-308, 2007.

SILVA, J. L. et al. Germinação de sementes de Chloris barbata (L.) Sw. Em função da Luz. **Revista de Ciências Agro-Ambientais**, v. 7, p. 23-24, 2009.

TAKANO, H. K. et al. Trp2027Cys mutation envolves in *Digitaria insularis* with cross-resistance to ACCase inhibitors. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, In press, 2020.

TAKANO, H. K. et al. Proline-106 EPSPS mutation imparting glyphosate resistance in goosegrass (*Eleusine indica*) emerges in South America. **Weed Science**, v. 67, p. 48-56, 2019.

TAKANO, H. K. et al., Chemical control of glyphosate-resistant goosegrass. **Planta Daninha**, v. 36, 2018.

TAKANO, H. K. et al. Crescimento, desenvolvimento e produção de sementes de capim-pé-de-galinha. **Planta Daninha**, v. 34, p. 249-258, 2016.

TOZZI, E.; VAN ACKER, R. C. Effects of seedling emergence timing on the population dynamics of horseweed (*Conyza canadensis* var. *canadensis*). **Weed Science**, v. 62, p. 451-456, 2014.

TROPALDI, L. et al. Herbicidas inibidores do fotossistema II em pré-emergência no controle de espécies de capim-colchão. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 16, p. 30- 37, 2017.

VARGAS, L. et al. Caracterização e manejo de azevém (*Lolium multiflorum* L.) resistente a herbicidas em áreas agrícolas. **Revista Plantio Direto & Tecnologia Agrícola**, v. 162, p. 15-19, 2018.

VARGAS, L. et al. Manejo de resistência em sistemas de cultivo soja/milho. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE PLANTAS DANINHAS NO NORDESTE, 2., 2013, **Palestras**... Campina Grande. Desafios, avanços e soluções no manejo de plantas daninhas: Brasília, DF: Embrapa SBCPD, 2013.

VARGAS, L.; BIANCHI, M. A. Manejo e controle de plantas daninhas em trigo. In: PIRES, J. L. F. et al. **Trigo no Brasil: Bases para produção competitiva e sustentável**. Passo Fundo, RS: Embrapa Trigo, 2011. p. 253-262.

VIDAL, R. A. et al. Impacto da temperatura, irradiância e profundidade das sementes na emergência e germinação de *Conyza bonariensis* e *Conyza canadensis* resistentes ao glyphosate. **Planta Daninha**, v. 25, p. 309-315, 2007.

VOLL, E. et al. **Controle de plantas daninhas: sistemas de manejo de culturas com soja e efeitos alelopáticos do ácido aconítico.** Circular Técnica 101. EMBRAPA: Lon-

drina - PR, 2013.

WARD, S. M.; WEBSTER, T. M.; STECKEL, L. E. Palmer Amaranth (*Amaranthus palmeri*): A Review. **Weed Technology**, v. 27, n. 1, p. 12-27, 2013.

WU, H. et al. Germination, persistence, and emergence of flaxleaf fleabane (*Conyza bonariensis* [L.] Cronquist). **Weed Biology and Management**, v. 7, p. 192-199, 2007.

YAMASHITA, O. M.; GUIMARÃES, S. C. Germinação de sementes de *Conyza canadensis* e *Conyza bonariensis* em diferentes condições de temperatura e luminosidade. **Planta Daninha**, v. 29, p. 333-342, 2011.

ZOBIOLE, L. H. S. et al. Controle de capim-amargoso perenizado em pleno florescimento. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 15, p. 157-164, 2016.

CAPÍTULO 13

TECNOLOGIA DE APLICAÇÃO PARA HERBICIDAS

Fabiano Griesang[1]
Marcelo da Costa Ferreira[2]

[1]Mestre, UNESP, Câmpus Jaboticabal – SP, [2]Professor UNESP, Câmpus Jaboticabal

1 INTRODUÇÃO

Planta daninha é qualquer planta que cresce onde não é desejada, como resultado de um processo de evolução natural ou antropogênico (PITELLI, 1987). Em âmbito agronômico, interferem de forma negativa nas atividades agropecuárias, sendo responsabilizadas por perdas diretas ou indiretas aos cultivos que superam as perdas por doenças e por pragas (FAO, 2009). Dada sua adaptação evolutiva, incrementada pela diversidade de espécies e pela amplitude de formas de propagação, não se considera a possibilidade de sua total eliminação de áreas agrícolas (PEREIRA et al., 2011), devendo-se, portanto, estabelecer estratégias de manejo.

Para o manejo, recomenda-se adotar todos os métodos de controle disponíveis (cultural, mecânico, biológico e químico), realizados de forma individual ou combinada (OLIVEIRA; FREITAS, 2008). A escolha do método de controle deve considerar aspectos sociais, econômicos e ambientais da conjuntura local e temporal. Consideram-se em cada contexto as características das plantas daninhas, da cultura implantada, das condições ambientais, das dimensões da propriedade e da tecnologia disponível para as ações (PEREIRA et al., 2011). O levantamento florístico para reconhecimento das espécies presentes na área é fundamental para a escolha de métodos de controle que comporão a estratégia de manejo das plantas daninhas (BRIGHENTI et al., 2016).

Entre os métodos de controle, o controle químico de plantas daninhas, entendido praticamente como sinônimo da pulverização de herbicidas, tornou-se o predominante nos mais diversos sistemas agrícolas por apresentar versatilidade para diversas espécies, e possuir flexibilidade quanto à época de aplicação, o que permite otimizar o maquinário disponível, ter controle efetivo de plantas daninhas junto à linha de semeadura (OLIVEIRA, 2011), reduzir a ocorrência de rebrota das plantas daninhas, possuir ação prolongada e atuar tanto na pré como na pós-emergência das plantas daninhas.

Este método também possui limitações e implicações, uma vez que a eficiência do tratamento com herbicidas depende de fatores conceituados na tecnologia de aplicação, entre os quais a identificação correta do problema, a escolha adequada do produto e a adequação do equipamento (SANTOS et al., 2017).

2 TECNOLOGIA DE APLICAÇÃO

Conceitualmente, a tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários é o emprego de conhecimentos científicos para promover a correta colocação do produto biologicamente ativo no alvo, no momento e na quantidade necessária, de forma econômica e com o mínimo de contaminação ambiental (MATUO, 1990).

Seguir este conceito a campo implica maior qualidade e chance de sucesso do tratamento realizado para o controle das plantas daninhas, com menor consumo de recursos humanos, naturais e financeiros, e com menores riscos ao homem e ao ambiente. Devem-se considerar, portanto, os aspectos da regulagem do pulverizador (escolha das gotas produzidas pela ponta de pulverização numa pressão de trabalho, a altura de barra e a velocidade de deslocamento), a observação das condições meteorológicas no momento da aplicação, o volume de aplicação, a constituição da calda, as características do alvo, as calibrações e as manutenções dos equipamentos e a habilitação de operadores (GRIESANG; FERREIRA, 2018).

2.1 Constituição da calda

As caldas fitossanitárias são compostas principalmente por água, com a adição de um ou mais produtos comerciais formulados, em concentrações que podem variar de menos de um para mais de 20% (v/v).

A água possui características próprias com vantagens e desvantagens de seu uso. Como principais vantagens estão a abundância, o baixo custo e sua característica de dissolução ou suspensão da maior parte das substâncias adicionadas a ela. Como principais desvantagens estão a alta tensão superficial e a alta pressão de vapor.

A alta tensão superficial induz nas gotas pulverizadas a manterem-se em formato esférico, mesmo quando depositadas sobre superfícies (MATUO, 1990). A tensão superficial refere-se às forças de coesão entre moléculas semelhantes que resultam na formação de uma camada elástica na interface entre duas fases químicas. Dentre os líquidos utilizados para pulverização, a água é a que possui a maior tensão superficial, com valor normal de 72,9 mN/m, a 20°C.

Os produtos formulados geralmente são compostos pelo ingrediente ativo e por agentes tensoativos. Quando adicionados à água para a composição da calda, o resultado é um valor de tensão superficial via de regra menor do que o da água utilizada. Esta condição é desejada para aumentar o espalhamento das gotas sobre as superfícies em que são depositadas, visando a proporcionar maior cobertura dos alvos e, em certos casos, a promover maior absorção do produto fitossanitário (Figura 1).

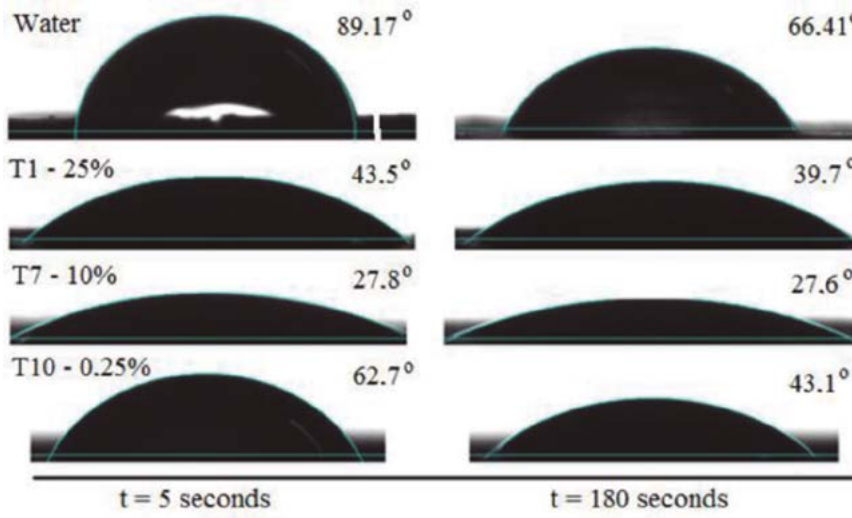


Figura 1. Ângulo de contato formado por gotas depositadas sobre folhas de café, usando quatro caldas fitossanitárias em suas respectivas concentrações de óleo, após 5 e 180 segundos.
Fonte: Decaro Júnior et al. (2015).

A tensão superficial da calda formada influencia no tamanho das gotas pulverizadas, que, por sua vez, interfere na qualidade e na segurança de uma aplicação (FERNANDES et al., 2007; GRIESANG et al., 2017). Para alguns modelos de pontas de pulverização, a adição de adjuvantes à calda resulta em aumento no tamanho das gotas e em redução da fração das gotas sensíveis à deriva (CALORE et al., 2015).

O espalhamento das gotas não é exclusivamente dependente da tensão

superficial das caldas, embora possuam elevada correlação. Além desta característica, devem-se considerar também os aspectos morfológicos e bioquímicos da superfície vegetal onde a gota se deposita. Há superfícies com maior e com menor grau de afinidade à água. Portanto, o espalhamento e a adesão das gotas às superfícies serão resultantes da combinação de características do líquido e da superfície. Estas interações implicam ainda quantidade de produtos que fica retida na folha após a ocorrência de chuvas.

Quanto à pressão de vapor alta da água (17,21 mmHg), esta confere elevada possibilidade de evaporação. Como comparação de magnitude, o óleo de soja possui pressão de vapor de 2,12 mmHg a 21,1°C. Como a água na calda é fragmentada em gotas durante a pulverização, a taxa de evaporação é potencializada, graças ao aumento exponencial de evaporação devido ao aumento da superfície específica das partículas (MATUO, 1990).

A adição das formulações à calda pode reduzir a taxa de evaporação. Na aplicação da mistura de 2,4-D + glifosato, a associação ao óleo mineral reduziu o risco de deriva, devido ao aumento do tamanho das gotas produzidas (COSTA et al., 2017). O adjuvante fosfatidilcoline + ácido propiônico também pode ser usado com esse intuito (GANDOLFO et al., 2012). Outros aditivos, como a ureia em calda de glifosato, resultam na redução da porcentagem de deriva (GANDOLFO et al., 2013). Por outro lado, a composição da calda pela água, em sua maioria, mais a formulação, resulta num líquido complexo, uma vez que a própria formulação já é composta por um conjunto de ingredientes. Desta forma, a tensão superficial da calda também pode ser influenciada pela formulação do produto fitossanitário, e a resposta da constituição da calda na formação de gotas está muito relacionada ao modelo de ponta de pulverização utilizado, uma vez que determinada calda fitossanitária pode apresentar bons resultados para um modelo de ponta de pulverização e resultados contrários para outro modelo (COSTA et al., 2017).

De maneira geral, quando se adiciona a formulação (soluto) à água (solvente) inicia-se o processo de solvatação do soluto onde suas moléculas passam a ser envolvidas pela água, dadas por trocas e ligações iônicas. Entretanto, para que este processo ocorra de maneira adequada, é indispensável que o reservatório (tanque) do pulverizador já contenha ao menos 20% de seu conteúdo com água antes de se iniciar a adição do produto formulado. Simultaneamente à adição do produto, ou

mesmo antes disto, deve-se proceder à agitação da calda, promovida por acessórios conhecidos por agitadores, disponíveis nas versões hidráulicas ou mecânicas. Ambas as versões, se bem dimensionadas e corretamente utilizadas, agitam bem o conteúdo do tanque. Se este procedimento é bem realizado, diversos dos problemas de incompatibilidade de formulações já são corrigidos, mantendo a calda estável. Nesta condição, o fluxo através do circuito hidráulico será harmônico, e a formação das gotas será mais previsível.

2.2 Preparo da calda

Definida a comunidade de plantas daninhas ocorrente na área a ser controlada e escolhido o herbicida a ser utilizado para se fazer o controle, chega o momento de preparar a calda para fazer a aplicação. A importância deste momento costuma ser negligenciada por grande parte dos aplicadores. Porém, muitas vezes, é crucial para a eficácia da aplicação.

A qualidade da água é muito importante. A presença de partículas minerais ou orgânicas em suspensão pode interagir com as formulações, resultando em aglomerados passíveis de obstruir filtros e pontas de pulverização, consequentemente comprometendo a estabilidade e a concentração das caldas.

A dureza da água interfere negativamente na calda de herbicidas, pois estes utilizam emulsificantes que atuam no equilíbrio de cargas que envolvem o ingrediente ativo. Em água dura, o equilíbrio é alterado, interferindo em geral negativamente para a eficiência do produto (QUEIROZ et al., 2008). Os maiores teores de dureza são encontrados em águas subterrâneas, e o teor de elementos químicos dependente da composição da rocha matriz (FARIA et al., 2014).

Herbicidas como glifosato, 2,4-D, paraquat, sethoxydim, clethodim, bentazon, chlorimuron-etil e imazetapyr podem ter sua eficiência afetada quando utilizadas águas duras e calda com pH alcalino. O valor de pH dos açudes e poços, fontes utilizadas pelos produtores para o preparo das caldas, é considerado elevado para a aplicação de herbicidas, como o 2,4-D amina e o glifosato, sendo necessária a correção do pH, com o uso de produtos redutores de pH junto à calda de pulverização (FARIAS et al., 2014).

Entretanto, na água, deve ser também avaliada a quantidade de íons, como Fe^{+3} e Al^{+3}, por exemplo, visto que esses íons podem reagir com o herbicida, reduzindo sua eficácia (QUEIROZ et al., 2008). Portanto, a qualidade da água deve ser considerada de forma mais completa, no intuito de diminuir os erros na interpretação de resultados e na perpetuação de falhas na aplicação (RAMOS; ARAÚJO, 2006).

2.3 Uniformização da calda no tanque do pulverizador e transporte "calda pronta"

Depois de preparada a calda, alguns produtos podem ter certa dificuldade em permanecer estáveis em solução. Para manter a calda homogênea e evitar problemas de incompatibilidade, é necessário que o equipamento onde a calda esteja armazenada, quer seja o próprio pulverizador ou então o entreposto, que pode ser o reservatório de um caminhão utilizado no sistema de "calda pronta", muito difundido e utilizado na cana-de-açúcar, possua um mecanismo eficiente de agitação da calda. Esse sistema resulta na economia de tempo e permite que a aplicação ocorra no momento ideal. A necessidade de armazenar uma solução de pulverização pode ser estendida, por exemplo, devido à ocorrência de chuva durante a aplicação. Isto pode comprometer a estabilidade da calda no tanque, reduzindo a eficácia dos herbicidas (SANTOS et al., 2018). Para manter a estabilidade, a agitação deve ser mantida até que a calda seja completamente utilizada.

Em estudo realizado para avaliar a condutividade elétrica e o pH das caldas armazenadas por até 72 horas sem agitação, observou-se que houve diminuição no pH e aumento na condutividade elétrica com o aumento do tempo de armazenamento (SANTOS et al., 2018). No estrato superior da solução de pulverização, a condutividade elétrica foi maior do que nos outros estratos e tornou-se maior após 24 horas de armazenamento. No estrato médio, houve o aumento após 48 horas de armazenamento, e na parte inferior, estratos após 72 horas de armazenamento da solução de pulverização. Assim, a ausência de agitação interfere nas propriedades químicas da calda contendo o herbicida, com possível influência no controle das plantas daninhas.

A ordem de adição dos produtos no tanque, quando for adicionado mais

de um mesmo tempo, e a compatibilidade entre esses produtos também devem ser consideradas, uma vez que a solvatação é característica da interação de cada soluto com a água.

2.4 Seleção e configuração do equipamento aplicador

Uma vez definidos o produto e a calda para mitigar um problema com plantas daninhas, a seleção e a configuração do equipamento são cruciais para o êxito da operação, quanto ao controle do alvo, à segurança ambiental e ao desempenho operacional.

Como o investimento em pulverizadores é alto, faz diferença selecionar aquele que realmente atende ao tamanho e aos propósitos da propriedade onde será empregado. O bom dimensionamento do equipamento significa investimento adequado do recurso financeiro na compra, para o atendimento das necessidades do tratamento fitossanitário no momento necessário, com bom planejamento de suas operações e manutenções. Há ferramentas de planejamento que utilizam equações matemáticas baseadas em estudos de movimentos e tempos das atividades a campo para modelar em sistemas computacionais que permitam estimar com boa exatidão como será a utilização do pulverizador (FERREIRA, 2000). O uso destas ferramentas auxilia na seleção do modelo de pulverizador apropriado para determinada operação e propriedade.

Os componentes do circuito hidráulico dos equipamentos e seu princípio de funcionamento são semelhantes, desde um pulverizador costal manual até os grandes e sofisticados automotrizes. Desta forma, o cuidado na seleção dos acessórios que comporão o pulverizador independente de seu tamanho ou preço, devendo ser considerado com igual critério e rigor técnico.

A boa escolha do tamanho de gotas, proporcionada por uma ponta de pulverização cuidadosamente escolhida, a instalação na posição correta na barra, da altura de trabalho da barra em relação ao alvo, a adequada pressão de trabalho e a velocidade de caminhamento do pulverizador ditarão a taxa de eficiência e segurança da aplicação. Nos itens a seguir, serão tratados mais detalhadamente os aspectos envolvidos na regulagem e na calibração dos pulverizadores.

2.5 Seleção do tamanho das gotas

O tamanho da gota ideal a ser utilizado em uma aplicação agrícola leva em consideração o alvo a controlar (tamanho, comportamento, localização), o produto (sistematicidade), as condições ambientais (velocidade do vento, umidade relativa, temperatura) e os fatores operacionais envolvidos (altura e oscilação da barra de pulverização, velocidade de operação).

Gotas de menor tamanho proporcionam maiores coberturas sobre os alvos e maior penetração em dosséis da cultura mais densos. Porém, quanto maior a porcentagem de volume com gotas menores que 100µm, maior será a sensibilidade à deriva pelo vento. Gotas finas também têm como característica a elevada superfície específica, o que resulta em evaporação mais rápida. Por outro lado, gotas grossas são mais seguras quanto às perdas pela deriva causadas pelo vento e quanto à evaporação. Mas resultam em menor cobertura e pior distribuição pelo dossel das culturas de grande densidade foliar. Ainda podem resultar em ricocheteio ou escorrimento, ou desperdício por acúmulo excessivo de calda quando permanecem concentradas num único ponto da superfície tratada.

Portanto, deve-se ter todo o cuidado na seleção o com tamanho da gota, como obtê-las e como mantê-las dentro do esperado. Geralmente, os fabricantes de pontas de pulverização apresentam em catálogo as classes de tamanho de gotas produzidas pelos modelos que estão sendo disponibilizados. Cabe ao profissional que acompanhará a aplicação proceder à seleção do tamanho que possivelmente proporcionará o depósito da calda no local adequado, com segurança.

Um item bastante útil para determinar se as gotas estão chegando adequadamente onde são necessárias, é o papel hidrossensível, comumente disponível em bons revendedores de acessórios para pulverização.

Selecionado o tamanho de gotas, o responsável pela aplicação deverá utilizar o modelo de ponta de pulverização que atenda à demanda do tamanho de gotas e do volume de aplicação para a situação e realizar a regulagem e posterior calibração do equipamento para a realização da aplicação.

Para produtos aplicados ao solo, como para herbicidas para pré-emergência de plantas daninhas, resultados satisfatórios de depósito são esperados para gotas de diâmetro maior (gotas extremamente grossas a ultra grossas) e com boa

distribuição sobre a superfície do solo. Esta configuração proporciona menores perdas por deriva e, portanto, probabilidade maior de alcançar o alvo, podendo ser suficientes entre 5% e 15% de cobertura verificadas no papel hidrossensível.

Herbicidas sistêmicos para pós-emergência das plantas daninhas, como glifosato e 2,4-D, podem ser aplicados com gotas muito grossas ou extremamente grossas, uma vez que têm a capacidade de se movimentar nos tecidos da planta atingida e redistribuir-se até os sítios de ação, promovendo o controle. Sendo assim, não requerem coberturas muito ricas para promoverem seu efeito, podendo ser suficientes entre 10% a 20% de cobertura verificadas no papel hidrossensível.

Para herbicidas com sistematicidade reduzida ou ainda para populações de plantas daninhas mais densas, com plantas de menor tamanho protegidas pelas maiores (efeito guarda-chuva), a utilização de gotas médias a grossas pode ser necessária, visando a preservar a cobertura próximo a 20%, mesmo nas posições de acesso mais difícil. Nestes casos, uma atenção maior deve ser dada às condições meteorológicas devido à maior propensão das gotas à deriva e à evaporação (GRIESANG; FERREIRA, 2018).

Nos catálogos dos fabricantes de pontas de pulverização, o tamanho de gotas produzidas pelas pontas é classificado quanto ao seu diâmetro mediano volumétrico (DMV), que é o diâmetro da gota que divide um determinado volume aplicado em duas partes iguais, ou seja, o valor do DMV corresponde ao diâmetro da gota tal, que metade do volume aplicado é de gotas maiores e metade de gotas menores que este valor. O tamanho das gotas recebe uma padronização referenciada por intervalos de diâmetro e pelo potencial de deriva (Tabela 1). Desde a década de 1970, o diâmetro de gotas tem sido medido pelo método do espalhamento de luz laser de baixo ângulo (apelidado de difração laser), considerado de elevada confiabilidade e sendo largamente utilizado.

Tabela 1. Classe de tamanho de gotas segundo o Diâmetro Mediano Volumétrico (DMV), produzido por pontas de pulverização. ASABE (2009).

Classe segundo DMV	Faixas de DMV (µm)	Potencial de deriva
Extremamente fina	< 60	muito alto
Muito fina	60 – 105	muito alto
Fina	106 – 235	muito alto
Média	236 – 340	alto
Grossa	341 – 403	médio
Muito grossa	404 – 502	baixo
Extremamente Grossa	503 – 665	baixo
Ultragrossa	> 665	muito baixo

Fonte: Adaptado de ASABE S572.1 Droplet Size Classification (2009).

Participam diretamente na formação das gotas e, consequentemente, no tamanho das gotas geradas, a ponta de pulverização, a pressão de trabalho e as propriedades físico-químicas da calda. Para efeitos práticos, a ordem de participação destes fatores no tamanho das gotas que representa a grande maioria das situações, pode ser apresentada pelo seguinte esquema (Figura 2):

Figura 2. Esquema ilustrativo de importância no tamanho das gotas para modelo da ponta de pulverização, pressão de trabalho e constituição da calda (GRIESANG; FERREIRA, 2018).

2.6 Seleção de pontas de pulverização

A seleção das pontas de pulverização é um passo fundamental para a aplicação de produtos fitossanitários, uma vez que é a ponta que determina a vazão e a qualidade de distribuição do líquido pulverizado e tem grande influência sobre o tamanho e a uniformidade das gotas (FERNANDES et al., 2007; CAMARA et al., 2008).

Erros na escolha da ponta de pulverização dificilmente são resolvidos com a alteração da pressão de trabalho ou com ouso de adjuvantes em caldas fitossanitárias. Assim, a pulverização deve-se iniciar pela escolha adequada da ponta de pulverização.

Há uma disponibilidade muito grande de modelos de pontas de pulverização, desenhados para suprir demandas específicas (Figura 3). Considerando as características das pontas de pulverização, é possível selecionar o modelo para cada necessidade, como para obter maior cobertura, ou para diminuir o risco de deriva, visto que este é um dos maiores problemas na pulverização de herbicidas (CHECHETTO et al., 2017).

A escolha correta das pontas de pulverização interfere no controle, pois afeta o depósito da calda sobre o alvo. A aplicação de glifosato com o modelo de ponta com indução de ar, comparada ao modelo tradicional, proporciona redução de 70% na deriva, em condições ambientais controladas (GRIESANG et al., 2017). Em estudo visando ao controle de *Digitaria horizontalis* e *Urochloa decumbens*, a aplicação de hexazinona + diuron resultou no maior controle quando utilizada às pontas AI 11002-VS e TF-VP5, devido ao maior depósito do herbicida nas folhas (MACIEL et al., 2008).

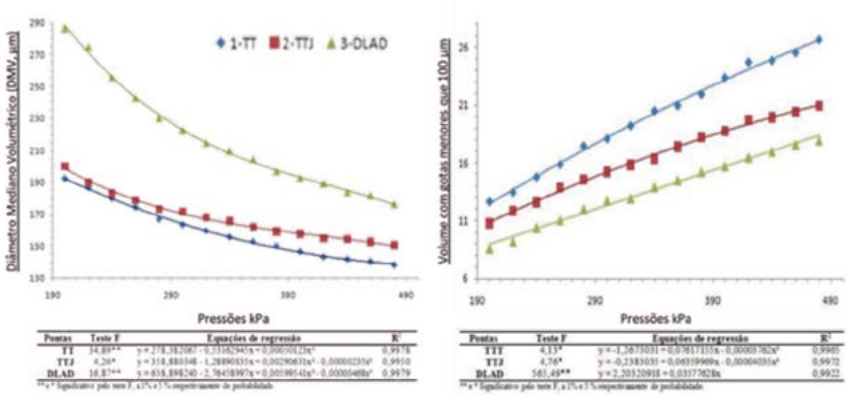
Desta forma, para a aplicação de herbicidas, geralmente são recomendadas e podem ser utilizadas pontas de pulverização que produzem gotas médias ou maiores, com a finalidade de reduzir o potencial de deriva (CUNHA et al., 2003; DORR et al., 2013). Estas gotas são produzidas comumente por modelos com pré-orifício, ou defletores, ou com indução de ar, ou com todas estas características combinadas (Figura 3).

Figura 3. Exemplos de modelos de pontas de pulverização comumente encontrados no mercado. Da esquerda para a direita: gotas maiores (menor potencial de deriva) para gotas menores (maior potencial de deriva). IA – Indução de ar.
Fonte: Adaptado de TEEJET TECHNOLOGIES (2014).

De modo geral, as pontas para aplicação de herbicidas devem ser escolhidas conforme a calda a ser pulverizada e o alvo, sendo mais utilizados no campo os modelos de jato plano. Complementarmente, deve-se atentar para a pressão de trabalho que também interfere no tamanho das gotas e, consequentemente, no resultado da aplicação.

2.7 Pressão de trabalho

A pressão de trabalho interfere de maneira direta e significativa no tamanho e na uniformidade das gotas produzidas, no ângulo de abertura do jato pulverizado, no volume de aplicação e na vida útil das pontas de pulverização e de outros constituintes do circuito hidráulico do pulverizador (Figura 4). Via de regra, o aumento da pressão de trabalho implica redução do tamanho das gotas e maior porcentagem de volume com gotas mais suscetíveis ao arraste pelo vento.



Pontas	Teste F	Equações de regressão	R^2
TT	34,89**	y = 278,382687 - 0,33382945x + 0,000301228x²	0,9918
TTJ	4,26*	y = 318,880348 - 1,28890835x + 0,00290635x² - 0,00000235x³	0,9910
DLAD	16,87**	y = 618,898240 - 2,78458997x + 0,00199541x² - 0,00000488x³	0,9979

** e * Significativo pelo teste F, a 1% e 5% respectivamente de probabilidade.

Pontas	Teste F	Equações de regressão	R^2
TTJ	4,13*	y = -1,26735031 + 0,07417315x - 0,00003782x²	0,9981
TTJ	4,76*	y = -0,23830351 + 0,04359969x - 0,00004031x²	0,9972
DLAD	561,49**	y = 2,20320918 + 0,03377628x	0,9922

** e * Significativo pelo teste F, a 1% e 5% respectivamente de probabilidade.

Figura 4. Variação do diâmetro mediano volumétrico (DMV) e da porcentagem de volume com gotas menores que 100µm, segundo a pressão de trabalho e de modelos de pontas de pulverização.
Fonte: Adaptado de Barreto, (2011).

Em estudo realizado sobre o controle de *Bidens pilosa* com as pontas de jato plano XR 110015, DG 110015 e TT 110015, nas pressões de 100; 200 e 300 kPa, e a ponta AI 110015, nas pressões de 200; 300 e 400 kPa, observou-se que o aumento da pressão de pulverização refletiu melhor o controle das plantas daninhas com o herbicida utilizado e que a pressão de 100 kPa foi inadequada para aplicações em pós-emergência de herbicida com ação de contato (bentazon), com as pontas XR, DG e TT (BOLLER; MACHRY, 2007).

Considerando a maior importância da correta seleção da ponta de pulverização que interfere mais significativamente nas características de tamanho de gotas, entende-se que a pressão de trabalho se torna um item de ajuste, com versatilidade para tamanho de gotas e vazão durante o processo de calibração do pulverizador.

2.8 Altura da barra

A altura da barra tem grande influência na eficiência da pulverização, pois determina a uniformidade de distribuição da calda na área e atua na propensão das

gotas ao arraste pelo vento e pela evaporação no caminho entre a máquina e o alvo. Em aplicações em área total com a barra muito baixa, podem resultar em sobreposição insuficiente dos jatos, reduziando a uniformidade de distribuição volumétrica. Com a barra muito alta, especialmente quando utilizadas gotas de tamanho pequeno e em situação de ventos com velocidade maior que 10 km/h, podem resultar em grandes perdas por deriva, diminuindo a eficácia de controle na área e sendo fonte potencial de contaminação de outras áreas. A altura de trabalho comumente recomendada a campo para as barras é de 50 cm em relação ao topo da superfície tratada.

2.9 Espaçamento entre bicos

Também relacionado com a qualidade da distribuição, o espaçamento entre bicos pode representar perdas significativas na qualidade da aplicação. Espaçamentos entre bicos desiguais em uma barra poderão gerar a intoxicação de cultivos, devido a excessos de produto em pontos onde os bicos estão mais próximos e, por outro lado, falhas no controle da planta daninha devido à insuficiência de produto onde os bicos estão mais afastados. Tem-se verificado a seleção de indivíduos resistentes nos campos de cultivo, sendo uma das hipóteses a de que a chegada de subdoses de produtos têm participado da seleção de espécies de plantas daninhas resistentes a alguns herbicidas utilizados.

2.10 Velocidade de trabalho

A velocidade de trabalho influencia no volume e na distribuição da calda aplicada. Maiores velocidades, mantendo constante a vazão e o espaçamento entre bicos, indicam menores volumes de aplicação. Além disso, este fator está relacionado ao desempenho operacional dos equipamentos e à qualidade das aplicações. Por um lado, maiores velocidades garantem maior capacidade operacional e, por outro lado, estão relacionadas à qualidade pior das aplicações, devido à ocorrência de deriva.

2.11 Regulagem e calibração de pulverizadores

A regulagem do pulverizador consiste na configuração do equipamento para a aplicação, de modo a considerar o alvo a ser atingido, o produto utilizado, o volume de aplicação requerido, a velocidade de trabalho, a pressão do sistema de pulverização, o tamanho de gotas e as condições meteorológicas no momento da aplicação.

Compete à calibração, a avaliação a campo, se as gotas realmente estão chegando sobre o alvo em quantidade e distribuição satisfatórias. Para esta etapa, é preferível a utilização de líquido de pulverização não tóxico com propriedades físico-químicas semelhantes à apresentada pela calda final. Neste intuito, é recomendável a utilização da água de pulverização acrescida apenas de adjuvantes que apresentem baixo custo, baixa toxicidade para o operador e confiram à calda tensão superficial semelhante à "calda final", uma vez que este parâmetro influencia na formação de gotas e no espalhamento sobre a superfície-alvo. A água pura não é uma boa opção para a calibração.

Se a qualidade/quantidade de gotas que atinge o alvo está satisfatória, procede-se à aplicação. Caso contrário, é feita nova regulagem do equipamento, sendo alterado o modelo de bicos, a pressão do sistema de pulverização, a velocidade de trabalho e/ou o volume de aplicação, conforme a necessidade, seguida de nova aferição (calibração) até que os parâmetros satisfatórios sejam atingidos.

A regulagem e a calibração de pulverizadores são práticas que devem ser realizadas toda vez que ocorrem alterações em parâmetros da pulverização, como diferentes culturas ou estádios de desenvolvimento da cultura ou da planta daninha (a superfície a ser atingida pelas gotas pode ser diferente!), das propriedades intrínsecas aos produtos (produtos sistêmicos e de ação de contato exigem coberturas diferentes!), do relevo do local e das condições ambientais divergentes daquelas em que fora realizada a calibração (temperatura, umidade relativa e velocidade do vento).

2.12 Manutenção

Práticas rotineiras de manutenção de máquinas e equipamentos podem prolongar a sua vida útil e garantir a melhor qualidade dos serviços realizados. Os pulverizadores possuem partes móveis que necessitam de lubrificação e troca de óleo. Há constituintes do sistema hidráulico fabricados em plástico e borracha, ressecam com o tempo e resultam em vazamentos, devendo ser substituídas conforme a necessidade.

Peças funcionais, como mangueiras, filtros e pontas de pulverização, não duram para sempre! Estas também devem ser substituídas conforme o desgaste, a fadiga ou avarias causadas pelo uso.

Para as pontas de pulverização, recomenda-se a realização de aferições da vazão e da qualidade da distribuição volumétrica produzidas. Pontas de pulverização com vazões até 10% maiores que o nominal são consideradas servíveis. Para valores maiores que este, é recomendável a substituição por um exemplar novo de mesmo modelo e vazão. Vazões inferiores à média podem ocorrer devido a obstruções que podem estar relacionadas ao filtro ou ao próprio orifício da ponta de pulverização. Neste caso, deve-se proceder à limpeza e reavaliar. Deve-se ter bom-senso na substituição de todas as pontas ao mesmo tempo, na barra de pulverização. O fato é que não se devem manter exemplares fora das especificações aceitáveis. Numa eventual troca de todas as pontas, por se considerar como viável, dado o desgaste mais generalizado na barra, aqueles exemplares que se encontrarem em melhores condições podem ser preservados como sobressalentes para momentos emergenciais. Os demais devem ser descartados para evitar confusões desnecessárias.

Infelizmente, ainda não há no Brasil um programa oficial de avaliação e homologação de equipamentos de aplicação. Portanto, esta atividade deve seguir a planos de manutenção próprios das empresas do setor produtivo, embasados nos manuais de operação dos fabricantes dos equipamentos.

Além desta forma, há algumas iniciativas privadas valorosas de realização de avaliações, mas que atendem apenas um número parcial de produtores a campo.

2.13 Habilitação de operadores

Ter em mãos um equipamento pulverizador de alta tecnologia e uso de produtos de eficácia comprovada não garantem uma boa prática das aplicações. O operador é o principal responsável em realizar e acompanhar a aplicação. Assim, a conscientização, o preparo e o engajamento do operador na atividade são muito importantes para que ele realize um trabalho acertado. O conhecimento produzido nos centros de ensino e de pesquisa e nas empresas do setor ainda está distante do que é empregado em grande parte das empresas agrícolas. Isto pode dever-se ao método de difusão do conhecimento, ou até no despreparo do setor em receber e assimilar as informações.

Outra causa patente é que, a exemplo das máquinas, também não há um programa oficial de habilitação de operadores. Sendo assim, o aprendizado dá-se na prática, passando de um mais experiente para outro mais novato, com alguma intervenção de fornecedores e, esporadicamente, em contato com técnico especializado. Melhor seria se houvesse um bom modelo discutido e adotado por consenso e praticado sob licenciamento formal e certificado, como ocorre em diversos países pelo mundo.

Neste ambiente desafiador, as pessoas envolvidas com o setor precisam de melhor assistência e transferência de informações. O produtor rural, que está na ponta da cadeia, retornará a toda a cadeia produtiva, com a produção de produtos mais saudáveis e seguros, com menores custos produtivos e lucrativos, contribuindo para a soberania nacional deste setor que vem consagrando-se como ativo e competitivo.

REFERÊNCIAS

ASABE The American Society of Agricultural and Biological Engineers. Droplet Size Classification - ASABE S572.1: Standard to measure and interpret spray quality from tips. 1p. 2009.

BARRETO, A. F. **Avaliação de parâmetros da tecnologia de aplicação para o contro-**

le da ferrugem asiática da soja. 2011. 81p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2011.

BOLLER, W.; MACHRY, M. Efeito da pressão de trabalho e de modelos de pontas de pulverização sobre a eficiência de herbicida de contato em soja. **Engenharia Agrícola**, 2007.

CALORE, R. A.; FERREIRA, M. C.; RODRIGUES, N. E. L.; OTUKA, A. K. Distribution pattern, surface tension and contact angle of herbicides associated to adjuvants on spraying and control of Ipomoea hederifolia under rainfall incidence. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 4, p. 756–768, 2015.

CAMARA, F. T. et al. Distribuição volumétrica e espectro de gotas de bicos hidráulicos de jato plano de faixa expandida XR11003. **Engenharia Agrícola**, v. 28, p. 740-749, 2008.

CHECHETTO, R. G. et al. Caracterização da taxa de aplicação e pontas de pulverização utilizadas no Estado de Mato Grosso. **MAGISTRA**, v. 26, n. 1, p. 89-97, 2017.

COSTA, L. L. et al. Droplet spectra and surface tension of spray solutions by biological insecticide and adjuvants. **Engenharia Agrícola**, v. 37, n. 2, p. 292–301, 2017.

CUNHA, J.P.A.R. et al. Avaliação de estratégias para redução da deriva de agrotóxicos em pulverizações hidráulicas. **Planta Daninha**, v.21, n.2, p.325-332, 2003.

DECARO JUNIOR, S.T.; FERREIRA, M.C., LASMAR, O. Physical characteristics of oily spraying liquids and droplets formed on coffee leaves and glass surfaces. **Engenharia Agrícola**, v.35, n.3, p.588-600, 2015.

DORR, G. J. et al. A comparison of initial spray characteristics produced by agricultural nozzles. **Crop Protection**, v. 53, p. 109-117, 2013.

FAO. The lurking menace of weeds: Farmer's enemy No. 1. 2009. Disponível em:

<http://www.fao.org/news/story/en/item/29402/icode/>. Acesso em: 4 jan. 2018.

FARIAS, M. S. et al. Qualidade da água utilizada para aplicação de agrotóxicos na região central do Rio Grande do Sul. **Agrarian**, v. 7, n. 24, p. 355-359, 2014.

FERNANDES, A. P. et al. Caracterização do perfil de deposição e do diâmetro de gotas e otimização do espaçamento entre bicos na barra de pulverização. **Engenharia Agrícola**, v. 27, p. 728-733, 2007.

FERREIRA, M. C. **Validação de modelo matemático na avaliação da capacidade operacional de turboatomizadores em citros**. 2000. 69p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2000.

GALON, L. et al. Biological weed management – A short review. Revista Brasileira de Herbicidas, v. 15, p. 116–125, 2016.

GANDOLFO, M. A. et al. Potencial de deriva da mistura de 2,4-D com glyphosate. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v.11, n.3, p.332-338, 2012.

GANDOLFO, M. A. et al. Influência de pontas de pulverização e adjuvantes na deriva em caldas com glyphosate. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 3, p. 474-480, 2013.

GRIESANG, F. et al. How Much Do Adjuvant and Nozzles Mo dels Reduce the Spraying Drift? Drift in Agricultural Spraying. American. J**ournal of Plant Sciences**, v. 8, p. 2785-2794, 2017.

GRIESANG, F.; FERREIRA, M. C. Tecnologia de aplicação: Como evitar a deriva? In: GUIMARÃES, A. C. D.; INOUE, M. H.; IKEDA, F. S. (Org.). **Estratégias de Manejo de Plantas Daninhas para Novas Fronteiras**. Curitiba, PR: Editora da SBCPD. Cáceres, MT: Editora da Unemat, 2018.

MACIEL, C. D. G. et al. Eficiência e seletividade dos herbicidas trifloxysulfuron-sodium+ ametryne e hexazinone+ diuron em função da tecnologia de aplicação e do manejo mecânico da palha de cana-de-açúcar na linha de plantio. **Planta daninha**, p. 665-676, 2008.

MATUO, T. **Técnicas de aplicação de defensivos agrícolas**. 1. ed. Jaboticabal: FUNEP, 1990.

NACHTIGAL, G. F. Controle biológico de plantas invasoras exóticas no Sul do Brasil por meio de fitopatógenos: princípios e estratégias de aplicação em ecossistemas agrícolas e naturais. **Embrapa Clima Temperado**, v. Domumentos, p. 49, 2009.

OLIVEIRA, R. S. Introdução ao Controle Químico. In: OLIVEIRA JR, R. S.; CONSTANTIN, J.; INOUE, M. H. (Eds.). **Biologia e Manejo das plantas Daninhas**, 2011, p. 125–140.

PEREIRA, F. A. R.. et al. Controle de plantas daninhas em pastagens. **Embrapa Gado de Corte**, v. Documentos, p. 26, 2016.

PITELLI, R. A. Competição e controle das plantas daninhas em áreas agrícolas. Série Técnica IPEF: Piracicaba, v.4, n.12, p. 1-24, 1987.

QUEIROZ, A. A.; MARTINS, J. A. S.; DA CUNHA, J. P. A. R. Adjuvantes e qualidade da água na aplicação de agrotóxicos. **Bioscience Journal**, v. 24, n. 4, p. 08-19, 2008.

RAMOS, H. H.; ARAÚJO, D. de. **Preparo da calda e sua interferência na eficácia de agrotóxicos**. 2006. Artigo em Hypertexto. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2006_3/V2/index.htm>. Acesso em: 18 jan 2018.

SANTOS, C. A. M. et al. Does the storage of the herbicide spray solution with an adjuvante affect the spray solution stability? **Aspects of Applied Biology,** p. 223-228, 2018a.

SANTOS, C. A. M. et al. Regulagem, manutenção e calibração de pulverizadores agrícolas. In: CASTILHO, R. C.; BARILLI, D. R.; TRUZI, C. C. (Org.). **Tópicos em Entomologia Agrícola** - X. 1. ed. Jaboticabal - SP: Gráfica Multipress Ltda., 2017, p. 179-190.

TEEJET TECHNOLOGIES. **Catálogo 51A-PT Wheaton**, Illinois Spraying Systems Co., 2014. Disponível em: <http://teejet.it/media/464368/cat51a_lo-res_portuguese.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2017.

TESSMANN, D. J. Controle Biológico: Aplicações na Área de Ciência das Plantas Daninhas. In: OLIVEIRA JR, R. S.; CONSTANTIN, J.; INOUE, M. H. (Eds.). **Biologia e Manejo de Plantas Daninhas**, 2011, p. 79-95.

WIKIPÉDIA. **Propriedades Físico-Químicas da água**. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2018. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Propriedades_f%C3%ADsico-qu%C3%ADmicas_da_%C3%A1gua&oldid=51572846>. Acesso em: 05 abr. 2018.

CAPÍTULO 14

ECOTOXICOLOGIA DOS HERBICIDAS: APLICAÇÕES E DINÂMICA AMBIENTAL

Claudinei da Cruz[1]
Wílson Roberto Cerveira Júnior[1,2,4]
Pâmela Castro Pereira[1,2,4]
Nathália Garlich[2]
Jaqueline Franciosi Della Vechia[3]
Leonardo Bianco de Carvalho[4]

[1] Laboratório de Ecotoxicologia e Eficácia dos Agrotóxicos – LEEA, Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos – UNIFEB, Barretos, São Paulo, Brasil. [2] Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista – FCAV/UNESP, Jaboticabal, São Paulo, Brasil.[3] Pós-Graduação em Agronomia (Entomologia Agrícola), FCAV/UNESP, Jaboticabal, São Paulo, Brasil.[4] Laboratório de Matologia – LabMATO, FCAV/UNESP, Jaboticabal, São Paulo, Brasil.

RESUMO

A ecotoxicologia é uma ferramenta fundamental para registro, regulamentação e monitoramento ambiental de produtos químicos, especialmente herbicidas. O estabelecimento da toxicidade relativa para espécies de diferentes níveis da cadeia trófica é fundamental para estabelecer o grau de efeito de um herbicida nos ambientes terrestre e aquático. Este capítulo aborda aspectos ecotoxicológicos dos herbicidas e seus possíveis impactos sobre o meio ambiente, destacando a importância do monitoramento ambiental como ferramenta de uso correto e seguro desses produtos.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, um dos grandes desafios da produção mundial de alimentos, fibras e energia é a manutenção da qualidade ambiental, diminuindo os impactos e a contaminação dos agroecossistemas e dos sistemas biológicos naturais. A intensificação do uso de herbicidas na agricultura, os manejos de florestas plantadas, os canais de irrigação, o controle de vetores e de plantas aquáticas têm contribuído para possíveis efeitos ambientais desta classe de agrotóxicos.

Dentre os poluentes ambientais no Brasil, os pesticidas (agrotóxicos) têm representado grande parte dos problemas de exposição ambiental com comercialização de 549.280,44 toneladas de ingredientes ativos em 2018. Destes, alguns produtos devem ser destacados, tais como: o glyphosate e seus sais (195.056,02 t), 2,4-D (48.921,25 t), mancozeb (40.549,92 t), atrazine (28.799,34 t), acephate (24.656,79 t), paraquat dichloride (13.199,97 t), enxofre (10.409,69 t), imidacloprid (10.021,22 t), óleo mineral (9.112,53 t) e oxicloreto de cobre (8.018,65 t) (IBAMA, 2019). Os pesticidas (agrotóxicos) são umas das principais fontes difusas de poluição no planeta. O declínio da qualidade da água doce e marinha pode ser associado ao escoamento destes produtos do ambiente terrestre de produção agrícola adjacente aos corpos hídricos e é uma das principais causas do mau estado de muitas das áreas costeiras (BRODIE et al., 2012; FILLOLS et al., 2020).

As contaminações dos sistemas aquáticos por agrotóxicos provenientes da

agricultura têm sido demonstradas por vários autores na literatura, especialmente por processo de lixiviação, carregamento superficial, percolação no solo, deriva ou volatilização (LORENTE et al., 2015). De uma forma geral, os herbicidas que são utilizados para o controle de plantas daninhas atingem e contaminam os corpos hídricos em pequenas concentrações (KILBRIDE et al., 1995), podendo causar efeitos subletais, como alterações, genéticas, bioquímicas, morfofuncionais nas diferentes populações de organismos aquáticos ou alterações na dinâmica das comunidades aquáticas. Em algumas situações, as concentrações de herbicidas presentes no ambiente aquático podem causar efeitos letais, levando à mortalidade de organismos aquáticos não alvos; e, mais recentemente, um tema ainda controverso é a ocorrência de efeito hormese em comunidades de fitoplâncton (EDGE et al., 2020) e em plantas aquáticas, como demonstrado por Peres et al. (2017), com subdoses de 2,4-D para *Egeria densa* e *Egeria najas*.

Para a avaliação dos possíveis efeitos ambientais dos agrotóxicos, a ecotoxicologia é um ramo da ciência que estuda os efeitos tóxicos causados por poluentes naturais ou sintéticos sobre quaisquer constituintes dos ecossistemas (TRUHAUT, 1977), sendo possível avaliar a toxicidade das substâncias químicas e sua dinâmica ambiental. Esta é uma importante ferramenta de estudo que permite verificar como os ecossistemas metabolizam, transformam, degradam, eliminam, acumulam e sofrem ação da intoxicação dos produtos químicos que atingem estes sistemas de forma direta ou indireta (AZEVEDO; CHASIN, 2004; ZAGATTO; BERTOLETTI, 2006), com avaliação dos efeitos dos contaminantes na biosfera, com análises, em grande escala, dos fenômenos químicos ambientais da exposição e dos efeitos na organização biológica (GUILIO; NEWMAN, 2008). Assim, a avaliação ecotoxicológica é importante para o controle, regulamentação e classificação das substâncias tóxicas quanto ao potencial de seu risco ambiental, a identificação do perigo e a avaliação da relação dose/resposta são etapas iniciais no processo de avaliação da toxicidade ou risco ambiental (USEPA, 2002).

Os estudos de toxicidade são ferramentas fáceis de serem empregadas e geram resultados sobre os possíveis efeitos ecotoxicológicos dos produtos químicos em organismos não alvos nos ambientes aquático e terrestre. Há dois critérios para avaliação ecotoxicológica, sendo o primeiro a determinação da toxicidade aguda e crônica inerente de uma substância química. Neste, caso utilizam-se organismos

padronizados internacionalmente em normas de ensaios, tais como: os peixes zebrafish (*Danio rerio*), fathead minnow (*Pimephales promelas*), os microcrustáceos *Daphnia magna, Daphnia similis e Ceriodaphnia dubia*, as algas *Psedokirchneriella subcapitata, Scenedesmus subspicatus e Selenastrum capricornutum*, dentre outros. As principais agências normatizadoras de ensaios ecotoxicológicos são: American Public Health Association (APHA), American Society for Testing Materials (ASTM), United States Environmental Protection Agency (USEPA), Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), International Organization for Standardization (ISO) e Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). Algumas normas brasileiras são utilizadas para a avaliação e a quantificação dos efeitos tóxicos do efluente, os métodos de ensaios ecotoxicológicos já normatizados pela ABNT, tais como: NBR 12713 (Ensaio com Daphnia – ecotoxicidade aguda); NBR 13373 (Ensaio com Ceriodaphnia - ecotoxicidade crônica); NBR 12648 (Ensaio com algas – ecotoxicidade crônica); NBR 15088 (Ensaio com peixes – ecotoxicidade aguda); NBR 15499 (Ensaio com peixes – ecotoxicidade crônica); NBR 15411 (Ensaio com *Vibrio fischeri* – ecotoxicidade aguda) (BERTOLETTI, 2013).

O segundo critério de avaliação de toxicidade refere-se aos possíveis efeitos ambientais para organismos bioindicadores nativos e representativos dos locais onde essa substância é utilizada. Além disso, são realizados estudos com bioindicadores locais que representam uma alternativa de baixo custo e rápida resposta para a estimativa da toxicidade ambiental (FARRÉ; BARCELÓ, 2003). O emprego destes organismos deve ser validado pela determinação de suas sensibilidades e uniformidades de respostas a substâncias referências padronizadas para as principais normas de teste. Normalmente, estas substâncias químicas para padronização de organismos testes são o dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$), cloreto de potássio (KCl), cloreto de sódio (NaCl) e cloroacetamida ($ClCH_2CONH_2$).

Os bioindicadores neotropicais nativos podem ser terrestres ou aquáticos, tais como: plantas terrestres (BOUTIN et al., 2012); minhoca (CHEN et al., 2014), caramujo de água-doce (*Pomacea canaliculata*) (VENTURINI et al., 2008), a samambaia-d'água (*Azolla caroliniana*) (SILVA et al., 2012), os peixes mato grosso (*Hyphessobrycon eques*), guaru (*Phallocerus caudimaculatus*) (CRUZ et al., 2008; MANSANO et al., 2018; ABE et al., 2019), anfíbio *Rhinella arenarum* (ARCAUTE et al., 2020), dentre outros.

Os critérios de escolha dos organismos-teste a serem empregados nestes estudos têm como premissa e fundamentação a possibilidade de desenvolver e de padronizar organismos da fauna nativa para estudos ecotoxicológicos. Estes estudos são importantes para: (i) a avaliação da toxicidade inerente de substâncias químicas para organismos nativos; (ii) a identificação dos efeitos de exposição e do contato de organismos não alvos; (iii) o estabelecimento de critérios de qualidade ambiental e de lançamento de efluentes químicos em corpos hídricos; (iv) a determinação da concentração ambiental estimada (CAE), a estimativa de resíduo de produtos químicos; (v) a concentração de efeito não observado (CENO); (vi) a concentração de efeito observado (CEO); e (vii) a determinação do risco à saúde ambiental de um ecossistema determinado (PITELLI et al., 2019).

Para a avaliação da toxicidade são utilizados organismos bioindicadores pertencentes aos diversos níveis da cadeia alimentar, os organismos-teste são selecionados através de alguns critérios como: sensibilidade, manejo, representatividade de um grupo taxonômico ecológico, ampla disponibilidade para execução de teste, existência de informações sobre a biologia da espécie, cosmopolita, tamanho suficiente para amostragem de tecidos e, preferencialmente, ser uma espécie nativa (RAND; PETROCELLI, 1985).

Assim, avaliação da dinâmica dos herbicidas após a aplicação na agricultura, conhecer a toxicidade inerente de cada molécula e a sensibilidade dos organismos aquáticos podem auxiliar na tomada de decisão sobre monitoramento e efeitos para a biota aquática. Recomenda-se fazer ensaios com, no mínimo, três espécies que representem diferentes níveis da cadeia trófica, a fim de obter resultados mais precisos e detectar um efeito tóxico ou não tóxico específico, aumentando a probabilidade de obter uma resposta tóxica com organismos de diferentes sensibilidades (RAND, 1995; PITELLI et al., 2019).

2 TOXICIDADE RELATIVA DE HERBICIDAS

A maior restrição da viabilidade de utilização de produtos químicos em ambientes aquáticos é o contato direto dos organismos não alvos com estas moléculas sem uma avaliação precisa da dinâmica ambiental (CEDERGREEN; STREIBIG, 2005;

SHIOGIRI et al., 2015). Alguns estudos com herbicidas triazinas (prometryn, prometo e simetryn) e ureias substituídas (diuron, fenuron e monuron) demonstraram que estes podem causar efeito de hormese do fitoplâncton, causando promoção de seu crescimento com os *end points* de efeito no citocromo b559, espécies reativas de oxigênio e óxido nítrico (ZHANG et al., 2020); o glyphosate causou efeito na regulação da expressão gênica no fungo *Aspergillus nidulans* (MESNAGE et al., 2020) ou efeitos sobre a comunidade de plantas aquáticas, anfíbios e organismos bentônicos em condição de wetland (EDGE et al., 2020). A concentração de 25,0 mg L^{-1} de clethodim aumentou a densidade das algas *Microcystis aeruginosa* e de *Raphidiopsis raciborskii* em 96 horas de exposição; assim, pequenas concentrações deste no ambiente aquático podem levar à proliferação de cianobactérias e alteração do conteúdo de cianotoxinas (BRÊDA-ALVES et al., 2020).

Nos ensaios de toxicidade aguda com organismos bioindicadores, estes são expostos de forma direta aos produtos químicos. Em geral, na avaliação ecotoxicológica, o organismo mais sensível é utilizado para classificar a toxicidade aguda de produtos químicos (SHIOGIRI et al., 2015). Os herbicidas ariloxifenoxipropionatos e ciclohexanodionas são inibidores da enzima acetil-CoA carboxilase (ACCase), e sua toxicidade relativa foi avaliada para a alga *Chlorella vulgaris* com concentração efetiva (CE50;96h) de 10,37 mg L-1 para o diclofop; de 5,21 mg L^{-1} para o quizalofop; de 10,35 mg L^{-1} para o haloxyfop-methyl; de 1,50 mg L^{-1} para o fenoxaprop-p-ethyl; de 21,70 mg L^{-1} para o fluazifop-p-buthyl; e de 38,70 mg L^{-1} para o clethodim (MA et al., 2002). Para a alga *Raphidocelis subcapitata*, a CE50;96h para diclofop foi de 5,29 mg L^{-1}; para o quizalofop de 0,26 mg L^{-1}, para o haloxyfop-methyl de 1,07 mg L^{-1}, para f fenoxaprop-*p*-ethyl de 0,89 mg L^{-1}; para o fluazifop-*p*-buthyl de 1,04 mg L^{-1}; e para o clethodim de 22,86 mg L^{-1} (MA et al., 2006). Para o organismo-teste terrestre minhoca (Eisenia fetida), a CL50;14d para fenoxaprop-*p*-ethyl, fluazifop-*p*-buthyl e quizalofop-*p*-ethyl foi de > 1.000,0; 518,0; > 1.000,0 µg cm^{-1} (WANG et al., 2012).

Para os herbicidas dos grupos químicos imidazolinonas e sulfonilureias inibidores da enzima acetolactato sintase (ALS) ou acetohidroxiácidos sintase (AHAS), a toxicidade relativa foi avaliada para a alga *Raphidocelis subcapitata*, para bensulfuron-methyl, bispyribac-sodium, chlorimuron-ethyl, cyclosulfamuron, ethametsulfuron, flumetsulam, metsulfuron-methyl, nicosulfuron e pyrazonsulfuron-ethyl que apresentaram CE50;96h de 13,59; 3,18; 5,53; 0,40; 30,19; 23,87; 24,69; 1,43; e

11,10 mg L^{-1}, respectivamente (MA et al., 2006). Para a minhoca *(Eisenia fetida)*, os herbicidas flutamone e mesotrione apresentaram CL50;14d de 26,98 e de 545,10 µg cm^{-1}, respectivamente, enquanto o metsulfuron-methyl, sulfometuron-methyl e rimsulfuron apresentaram CL50;14d > 1000,0 µg cm^{-1} (WANG et al., 2012). A toxicidade aguda do imazapyr foi estimada para os peixes mato grosso (*Hyphessobrycon eques*) com CL50;48h de 3,93 mg L^{-1}; para o zebrafish (*Danio rerio*) com 4,3 mg L^{-1}; para o guaru (*Phallocerus caudimaculatus*) com 5,30 mg L^{-1}; para o pacu (*Piaractus mesopotamicus*) com 8,19 mg L^{-1}; para as plantas aquáticas *Lemna minor e Azolla caroliniana* com 1,06 e 18,98 mg L^{-1} (CL50;7d), respectivamente, e para o caramujo com 5,89 mg L^{-1} (CE50;48h), sendo a lentilha-d'água (*Lemna minor*) o organismo mais sensível a este herbicida (CRUZ et al., 2015). Este herbicida apresentou CL50;7d de 21,10 mg L^{-1} para a planta aquática *Woffia brasiliensis* (PEREIRA et al., 2019). Para a planta-teste amendoim (*Arachis hypogaea*), os herbicidas diclosulam e imazapic apresentaram CL50;14d > 118,0 mg kg^{-1} de solo (DONEGÁ et al., 2015).

Dentre os herbicidas e seus possíveis impactos ambientais e fonte de poluição difusa para os diferentes níveis da biota, destaca-se atrazine (triazinas inibidoras do fotossistema II), com uma produção anual de 70.000 e 90.000 toneladas no mundo, e o quarto agrotóxico mais comercializado no Brasil (IBAMA, 2019), possui meia-vida no solo entre 4 e 57 semanas (BOOPATHY, 2017); na água, de aproximadamente 100 dias (HOU et al., 2017). Nas águas superficiais e subterrâneas, a concentração estimada foi de 4,6 mM (0,992 mg L^{-1}) em vários países (SCOTT et al., 2009) e, após 20 anos de proibição na União Europeia, sua concentração nas águas subterrâneas permaneceu em torno de 0,1 mg L^{-1} (VONBERG et al., 2014). Atrazine pode causar mutagenicidade, genotoxicidade, divisão celular anormal, erros na síntese de lipídios e desequilíbrio hormonal em peixes, anfíbios e répteis aquáticos (SOLOMON et al., 2008). A presença de 0,025 a 0,20 mg L^{-1} de atrazine na água, entre 4 e 8 dias, causou aumento na razão de crescimento, diminuição na conversão de energia no fotossistema II e redução no rendimento dos transportadores de elétrons em algas *Chlorella sp*. (SUN et al., 2020). A toxicidade aguda e os efeitos subcrônicos deste herbicida foram estimados para o *Piaractus mesopotamicus* com CL50;48h de 26,46 mg L^{-1}, com diminuição do epitélio interlamelar, edema subepitelial e estase sanguínea nas brânquias, consumo dos depósitos de glicogênio hepático e aumento no diâmetro dos capilares sinusoides do fígado e aumento na atividade da enzima

acetilcolinesterase no cérebro (SANTOS et al., 2015), indicando efeitos adversos para o peixe. Para a carpa comum (*Cyprinus carpio*), a toxicidade aguda de atrazine (CL50;96h) foi de 2,14 mg L^{-1}, e os níveis de mRNA e proteínas HSP60, HSP70 e HSP90 aumentaram no baço e nos rins, indicando alta toxicidade aguda e subcrônica, podendo fornecer uma ferramenta útil os efeitos deste herbicida para organismos aquáticos (XIN et al., 2015).

Os herbicidas inibidores do fotossistema I também apresentam risco ambiental e devem ser monitorados constantemente. O diquat apresentou, para o piauçu (*Leporinus macrocephalus*), concentração letal 50% (CL50;96h) de 34,76 mg L^{-1} (HENARES et al., 2008); para o pacu (*Piaractus mesopotamicus*) CL50;96h de 82,72 mg L^{-1} (HENARES et al., 2008); para a tilápia (*Oreochromus niloticus*) CL50;96h de 37,28 mg L^{-1} (HENARES et al., 2008); para o guaru (*Phallocerus caudimaculatus*) CL50;96h de 7,17 mg L^{-1} (HENARES et al., 2011); para mato grosso (*Hyphessobrycon eques*) com CL50;48h de 103,61 mg L^{-1}, sendo considerado praticamente não tóxico para este organismo-teste (GARLICH et al., 2016); para a planta aquática *Woffia brasiliensis*, apresentou CL50;7d de 0,07 mg L^{-1} (PEREIRA et al., 2019); e para larvas e formas jovens de fathead minnow (*Pimephales promelas*) CL50;7d de 2,04 mg L^{-1} e CL50;16d de 4,19 mg L^{-1}, respectivamente (MORETON et al., 2020).

Outro herbicida com mecanismos de ação de inibição do fotossistema I é o paraquat, e a exposição do tambaqui (*Colossoma macropomum*) na concentração subletal de 10 mg L^{-1}, causou desorganização celular, anormal regeneração das células epiteliais e deformação das células da cartilagem de sustentação das brânquias, áreas de necrose no fígado e hiperplasia do endotélio com ruptura da membrana vascular (SALAZAR-LUGO et al., 2011); e para a alga *Chlorella vulgaris* a CL50;96h, foi de 0,0002 mg L^{-1} (MA et al., 2002), sendo este um dos agrotóxicos mais comercializados no Brasil (IBAMA, 2019). Para *Woffia brasiliensis*, o paraquat apresentou CL50;7d < 0,05 mg L^{-1}, sendo classificado como extremamente tóxico para esta planta aquática (PEREIRA et al., 2019), o que indica alto risco de contaminação ambiental.

Glyphosate[(*N*-phosphonomethyl)glycine] é o herbicida mais utilizado no mundo e no Brasil (IBAMA, 2019). Sua dinâmica ambiental, a toxicidade e os efeitos deletérios em organismos não alvos são controversos (Tabela 1), dependendo da formulação e do tipo de adjuvante/surfactante presente no produto comercial,

sendo um dos produtos mais pesquisados no mundo. Este é um herbicida inibidor da enzima 5-enolpiruvilshiquimato-3-fosfato sintase – EPSPs, de amplo espectro, não seletivo e pós-emergente, utilizado para o controle de plantas daninhas. Seu maior produto de degradação e o ácido aminometilfosfônico (AMPA). A determinação de ambos os compostos em níveis de µg L^{-1} é difícil devido a sua alta polaridade e solubilidade em água e pela ausência de cromóforos e fluoróforos (HIDALGO et al., 2004). Para a determinação de resíduo glyphosate e do AMPA em água, pode utilizar-se da metodologia de derivação pré-coluna com 9-flourenylmetheyl chloroformate (FMOC-CL), utilizando-se de uma coluna polymeric amino e fase móvel em pH 10 contendo 55% de acetonitrila (ACN) e 50 mM de tampão fosfato (NEDELKOSKA; LOW, 2004).

Para Folmar et al. (1979), a concentração letal de 50% (CL50;96h) de glyphosate, na formulação Roundup®, foi de 2,3 mg L^{-1} para o peixe fathead minnow (*Pimephales promelas*); de 5,0 mg L^{-1} para o bluegills (*Lepomis macrochilas*); de 8,3 mg L^{-1} para a truta arco-íris (*Salmo gairdneri*); e de 13,0 mg L^{-1} para o bagre do canal (*Ictalurus punctatus*). Para o ingrediente técnico de glyphosate, foi de 97,0 mg L^{-1} para *Pimephales promelas*; de 140,0 mg L^{-1} para o *L. macrochilas e S. gairdneri*; e de 130,0 mg L^{-1} para o *Ictalurus punctatus*, indicando que os ingredientes inertes contribuem de forma significativa para o aumento da toxicidade deste herbicida.

Tabela 1. Toxicidade aguda relativa de diferentes formulações de glyphosate.

Organismo-teste	**CL50**	**Formulação**	**Autor**
Truta arco-íris (*Salmo gairdneri*)	1.070 mg L-1	Rodeo® + surfactante X-77	MITCHELL et al. (1987)
Salmão chinook (*Oncorhynchus tshawytscha*)	1.440 mg L-1	Rodeo® + surfactante X-77	
Truta arco-íris (*Salmo gairdneri*)	26,0 mg L-1	Roundup®	
Salmão chinook (*Oncorhynchus tshawytscha*)	20,0 mg L-1	Roundup®	
Truta arco-íris (*Oncorhyncus mykiss*)	10,42	Vision®	MORGAN; KICENIUK, (1992)

Organismo-teste	CL50	Formulação	Autor
Microcrustáceo (*Daphnia magna*)	218,0	Rodeo®	HENRY et al. (1994)
Anfípodo (*Hyalella azteca*)	720,0	Rodeo®	
Mosquito (*Chironomus riparius*)	1.216,0	Rodeo®	
Sanguessuga (*Nephelopis obscura*)	1.177,0	Rodeo®	
Carpa (*Cyprinus carpio*)	645,0	-	NESKOVIC et al. (1996)
Sapos australianos	81,2 a 121,0	ingrediente ativo glyphosate	MANN; BIDWELL (1999)
Adultos de tilápia (*Oreochromis niloticus*)	36,8	Roundup®	JIRAUNGKOORSKUL et al. (2002)
Alevinos de tilápia (*Oreochromis niloticus*)	3,2	Roundup®	
Ceriodaphnia dubia	5,7	Roundup®	TSUI; CHU (2004)
Hyalella azteza	1,5	Roundup®	

Para Shiogiri et al. (2010), glyphosate, na formulação Rodeo®, e a mistura do glyphosate + 0,5 e 1,0% do surfactante (alkylphenolpolyglycol ether) apresentaram CL50;96h) > 975,0 mg L^{-1} para o peixe gauru (*P. caudimacultus*) e foram classificados como praticamente não tóxicos para este bioindicador. Para o pacu (*Piaractus mesopotamicus*), o glyphosate, na formulação Roundup Ready®, a CL50;48h de 3,74 ± 0,2 mg L^{-1}, apresentou dano moderado a grave no fígado, com vacuolização citoplasmática, acúmulo de lipídios, alterações da membrana nuclear e celular, e depleção de glicogênio que podem afetar o processo de desintoxicação e/ou reparo tecidual e contribuir para a morte dos peixes (SHIOGIRI et al., 2012). Para esta mesmo formulação a CL50;48h, foi de 2,94 mg L^{-1} para alevinos de tilápia (*O. niloticus*), com aumento significativo nos parâmetros de cortisol sanguíneo nos animais expostos às concentrações subagudas do herbicida (KOAKOSKI et al., 2013). A toxicidade aguda do glyphosate depende do surfactante que compõe a formulação, e vários estu-

dos demonstraram esta relação. Para os peixes *Danio rerio*, *Piaractus mesopotamicus*, *Hyphessobrycon eques e Phallocerus caudimaculatus*, a concentração letal de 50% (CL50;96h) foi > 975,0 mg L^{-1}, na formulação Rodeo®, que não contém surfactante. A adição de 1,0% de alkylphenolpolyglycol ether (Aterbane®BR) diminuiu a CL50;96h para 528,50 e 411,91 mg L^{-1} para *Piaractus mesopotamicus e Hyphessobrycon eques* (CRUZ et al., 2016).

Também em estudos com minhoca (CHEN et al., 2014), a grande maioria dos autores concorda que as minhocas *Eisenia fetida e Eisenia andrei*, assim como outras minhocas, fazem bem o papel de bioindicadores sensíveis e oferecem inúmeras possibilidades de estudos de contaminação ambiental, tanto por agrotóxicos, como por metais, derivados do petróleo, antibióticos, produtos veterinários e outros poluentes (LOUREIRO et al., 2005).

A *E. fetida* bioacumulou o herbicida paraquat, de acordo com o aumento da concentração no solo (PAPINI et al., 2006). E em condições de solo agrícola brasileiro, as minhocas *E. fetida* bioacumalaram, mas não alteraram a dissipação do herbicida glyphosate (ANDRÉA et al., 2004).

Chen et al. (2014) encontraram para *E. fetida* CE50 para mistura de butachlor + atrazine de 0,87 mg L^{-1}; para butachlor + ʎcyhalothrim foi de 3,07 mg L^{-1}; para ʎ-cyhalothrim + atrazine foi de 0,39 mg L^{-1}, e para butachlor + ʎ-cyhalothrim foi de 0,88 mg L^{-1}.

3 MONITORAMENTO AMBIENTAL E EFEITOS EM PLANTAS-TESTE

As plantas-teste oferecem vantagem sobre outros organismos, pois são mais sensíveis ao estresse ambiental (VALERIO et al., 2007), além da facilidade de manipulação, armazenamento e correlação de baixo custo, e bom contraste com outros bioensaios (FISKESJÖ, 1993).

A utilização de herbicidas tem sido questionada pela possibilidade dos possíveis caminhos e rotas de transferência para camadas profundas do solo e para corpos hídricos adjacentes, trazendo possíveis prejuízos à fauna edáfica, aos polinizadores e às plantas não alvo, devido à exsudação de glyphosate pelas raízes das

plantas-alvo para o solo, permitindo que ele seja absorvido pelas plantas não alvo e pela deriva do produto no momento da aplicação, atingindo o solo e as plantas não alvo (TUFFI, 2005).

Com um sistema de produção intensivo, esta necessidade de uso de produto fitossanitários vem aumentando, devido à utilização, podendo acarretar aumento nos níveis de nitrato, fósforo e as concentrações residuais dos agrotóxicos ou de seus metabólitos, que por sua vez podem comprometer a qualidade das águas (FERRACINI et al., 2005).

Apesar de serem recomendados para aplicações em pós-emergência, parte do produto, inevitavelmente, chega ao solo, evidenciando a necessidade de se estudar seu comportamento no neste componente do ecossistema. No solo, quando o herbicida é aplicado, pode sofrer processos de sorção, lixiviação e/ou degradação por efeitos físicos, químicos e biológicos (VELINI, 1992). O processo de lixiviação é a principal forma de transporte no solo das moléculas não voláteis e solúveis em água (PRATA et al., 2003). A lixiviação é fundamental para a incorporação superficial da maioria dos herbicidas, atingindo sementes ou plantas em germinação; porém, em excesso, pode carreá-los para camadas mais profundas, deixando de ser eficaz e podendo lixiviar até o lençol freático (VELINI, 1992). Este movimento é a principal forma de transporte no solo das moléculas não voláteis e solúveis em água (ENFIELD; YATES, 1990; AYENI et al., 1998). As perdas anuais de pesticidas por lixiviação variam de <0,1% a 1%, quando a aplicação não é seguida de chuva intensa (FLURY, 1996). Entretanto, até 5% do pesticida aplicado podem ser lixiviados se a aplicação for seguida de precipitação intensa (CHRISTOFFOLETI et al., 2009). Entretanto, a manutenção de palhada sobre o solo pode reduzir a lixiviação, o que é atribuído à interceptação do produto (GISH et al., 1995; SADEGHI et al., 1998).

arte do herbicida aplicado nos sistemas de cultivo é perdido nos seguintes processos: volatilização de 10 a 90% (média de 40 a 80%), lixiviação de 0 a 4% (média de 1%), escorrimento superficial de 0 a 10% (média de 5%) e absorção pelas plantas de 1 a 10% (Média de 2 a 5%) (PLIMMER, 1992; OLIVEIRA JR, 2002), por isso a importância de se saber o herbicida que está usando, suas características físico-químicas, juntamente com as condições ambientais e aos atributos físicos, químico e biológico que regem seu comportamento (PROCÓPIO et al., 2003). Também a utilização de tecnologia de aplicação, pois uma boa aplicação é aquela que promove

o máximo de deposição de produto no alvo, com a mínima contaminação do ambiente (CHAIM, 2010).

A correlação entre as características inerentes a esses solos, como a presença de cargas dependentes de pH, a predominância de minerais de argila 1:1 e os óxidos de ferro e alumínio, além da grande importância da matéria orgânica na CTC total, definem a dinâmica desses produtos no solo, sendo que o destino de herbicidas no ambiente é escassamente abordado em trabalhos publicados até o momento (MANCUSO et al., 2011).

Outro problema emergente na utilização de herbicidas tem sido a intoxicação das plantas, causada por herbicidas utilizados durante o ciclo da cultura ou, ainda, por aqueles pulverizados em culturas antecessoras e que possuem efeito residual no solo, comprometendo, portanto, a produtividade.

O processo de dissipação de herbicidas no ambiente está relacionado com as propriedades físico-químicas do herbicida e do solo, com as condições climáticas, com o manejo e com o sistema de cultivo utilizado (CLAY, 1993; NIEKAMP; JOHNSON, 2001). Segundo Oliveira (2001), efeito residual é a habilidade que um herbicida tem para reter a integridade de sua molécula e, consequentemente, suas características físicas, químicas e funcionais no ambiente.

Entre os processos envolvidos após a aplicação dos herbicidas, está a retenção (sorção, adsorção e absorção), a transformação (degradação química e/ou biológica), o transporte (deriva, a volatilização, a lixiviação e o escorrimento superficial) e a interação entre todos esses processos (APPLEBY; DAWSON, 1994).

Em avaliação do efeito residual do herbicida imazaquin (mecanismo de ação - ALS) no solo ele causou toxicidade às plantas-teste de melão (*Cucumis melo*), de pepino (*Cucumis sativus*), de girassol (*Helianthus annuus*) e de mostarda (*Brassica alba*), até quando semeados aos 112 dias após a aplicação JOHNSON; TALBERT (1996). Também foi detectado prejuízo para o crescimento e a produtividade da cultura do milho plantada após a aplicação de imazaquin em soja (RENNER et al., 1988).

Carvalho et al. (2010), trabalhando com a avaliação do efeito residual dos herbicidas nicosulfuron isolado e nicosulfuron + atrazine nas culturas da soja, feijão, algodão, pepino, girassol e arroz, constataram diversos problemas de fitotoxidade. Os autores observaram que todas as culturas estudadas sofreram algum tipo de

efeito causado pelos herbicidas até 15 dias após a semeadura, diminuindo gradualmente aos 30 e 45 dias após a semeadura. É importante salientar que todos os sintomas de fitotoxidade já eram esperados devido à não seletividade dos herbicidas utilizados às culturas estudadas.

Em estudos utilizando beterraba como planta-teste crescendo dentro de um fitotron, determinou-se a persistência do sulfentrazone aplicado em janeiro na cultura da soja, nas doses de 0,6 kg ha^{-1} em 376 dias, sendo fitotóxico para as culturas sucedâneas de aveia-branca e milheto e não prejudicando as do feijão, girassol e trigo (BLANCO; VELINI, 2005).

Sendo assim, o conhecimento da interação destes fatores/plantas-teste é essencial para a aplicação racional e econômica de um herbicida, atendendo aos objetivos de controle de plantas daninhas com eficácia e seletividade para a cultura, com o mínimo de impacto ambiental.

4 CONCLUSÃO

Herbicidas são substâncias tóxicas por natureza. Por isso, seu uso deve ser feito com segurança, de acordo com a recomendação dos fabricantes. Percebe-se que o uso incorreto, geralmente relacionado à escolha de um produto não adequado ou de uma dose elevada, pode gerar problemas ambientais muito graves. Vários herbicidas são seguros. Mas alguns produtos, além de seu efeito direto, podem permanecer no ambiente por muito tempo, impactando sobre outros organismos presentes no ecossistema. Por isso, é essencial que se faça uso correto e seguro desses produtos e que seu monitoramento ambiental também seja realizado. Dessa maneira, será possível manter a sustentabilidade dos sistemas agrícola e não agrícola em que se faz uso de herbicidas para o controle de plantas daninhas e do manejo da vegetação. Caso contrário, tanto a sustentabilidade desses sistemas, quanto o uso desses produtos ficarão comprometidos.

REFERÊNCIAS

ABE, F.R. et al. Toxicity of Diflubenzuron and Temephos on Freshwater Fishes: Ecotoxicological Assays with *Oreochromis niloticus* and *Hyphessobrycon eques*. **Water, Air & Soil Pollution**, v. 230, n. 3, p. 77, 2019.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Ecotoxicologia aquática – Toxidade aguda—Método de ensaio com peixes.** ABNT:NBR, 15088, Brazil, 2016.

ANDRÉA, M.M. et al. Glyphosate: Influência na bioatividade do solo e ação de minhocas sobre sua dissipação em terra agrícola. **Planta Daninha**, v. 22, n. 1, p. 95-100, 2004.

APPLEBY, A.P. DA WSON, J.H. Microbial and non-microbial breakdown of herbicides in soil. In: Intensive course on the activity, selectivity, behavior, and fate of herbicides in plants and soils. West Lafayette, Indiana, USA. West Lafayette: Purdue University. **Departments of Horticulture, Agronomy, Botany and Plant Pathology, and Foresty and Natural Resources**, p. 446-462, 1994.

ARCAUTE, C.R. et al. Toxicity to *Rhinella arenarum* tadpoles (Anura, Bufonidae) of herbicide mixtures commonly used to treat fallow containing resistant weeds: glyphosate-dicamba and glyphosate-flurochloridone. **Chemosphere**, v. 245, p. 125623, 2020.

AYENI, A.O.; MAJEK, B.A.; HAMMERSTEDT, J. Rainfall influence on imazethapyr bioactivity in New Jersey soils. **Weed Science**, v. 46, p. 581-586, 1998.

AZEVEDO, F.D.; CHASIN, A.D.M. **As Bases Toxicológicas da Ecotoxicologia**. São Carlos-SP: Rima, 2004.

BERTOLETTI, E. **Controle ecotoxicológico de efluentes líquidos no estado de São Paulo**. CETESB, 2. ed. 2013.

BLANCO, F.M.G.; VELINI, E.D. Persistência do herbicida sulfentrazone em solo cultivado com soja e seu efeito em culturas sucedâneas. **Planta Daninha**, v. 23, p. 693-700, 2005.

BRÊDA-ALVES, F. et al. Clethodim (herbicide) alters the growth and toxins content of *Microcystis aeruginosa* and *Raphidiopsis raciborskii*. **Chemosphere**, v. 243, e125318, 2020.

BOOPATHY, R. Anaerobic degradation of atrazine. Int. **Biodeterior. Biodegrad**., v. 119, p. 626-630, 2017.

BOUTIN, C. et al. Phytotoxicity testing for herbicide regulation: Shortcomings in relation to biodiversity and ecosystem services in agrarian systems. **Science of Total Environment**, v. 415; p. 79-92, 2012.

BRODIE, J.E. et al. Terrestrial pollutant runoff to the Great Barrier Reef: an update of issues, priorities and management responses. **Mar. Pollut. Bull**., v. 65, p. 81-100, 2012.

CARVALHO, F.T.; MORETTI, T.B.; SOUZA, P.A. Efeito do residual no solo de nicosulfuron isolado e em mistura com atrazine. **Rev. Brasil. Herb**., v.9, n.1, p. 26-34, 2010.

CEDERGREEN, N.; STREIBIG, J.C. The toxicity of herbicides to nontarget aquatic 312 plants and algae: Assessment of predictive factors and hazard. **Pest Manag. Sci**., v. 313, n. 61, p. 1152-1160, 2005.

CHAIM, A.; VALARINI, P.J.; PIO, L.C. Avaliação de perdas na pulverização de agrotóxicos na cultura do feijão. Pesticidas: **Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, v.10, p.65-74, 2000.

CHEN, C. et al. Combined toxicity of butachlor, atrazine and λ-cyhalothrin on the earthworm *Eisenia fetida* by combination index (CI)-isobologram method. **Chemosphere**, v. 112, p. 393-401, 2014.

CHÈVRE, N. et al. Modeling the concentration–response function of the herbicide dinoseb on *Daphnia magna* (survival time, reproduction) and *Pseudokirchneriella subcapitata* (growth rate). Ecotoxicol. **Environmental Safety**, v. 62, n. 1, p. 17-25, 2005.

CHRISTOFFOLETI, P.J. et al. Comportamento dos herbicidas aplicados ao solo na cultura da cana-de-açúcar. **Piracicaba: CP**, v. 2, p. 72, 2009.

CLAY, D.V. Herbicide residues in soils and plants and their bioassay. In: STREIBIG, J.C.; KUDSK, P. **Herbicide bioassays**. Florida: CRC Press, 1993. p.153-172.

COUTRIS, C. et al. Can we predict community-wide effects of herbicides from toxicity tests on macrophyte species. **Aquat. Toxicol**., v. 101, n. 1, p. 49–56, 2001.

CRUZ, C. et al. Sensibilidade de peixes neotropicais ao dicromato de potássio. **J. Braz. Soc Ecotoxicol**., v. 3, p. 53-55, 2008.

CRUZ, C. et al. Imazapyr herbicide efficacy on floating macrophyte control and ecotoxicology for non-target organisms. **Planta Daninha**, v. 33, n. 1, p. 103-108, 2015.

CRUZ, C. et al. Sensitivity, ecotoxicity and histopathological effects on neotropical fish exposed to glyphosate alone and associated to surfactant. **J. Environ. Chemistry Ecotoxicol.**, v. 8, n. 3, p. 25-33, 2016.

CRUZEIRO, C. et al. Determination of 54 pesticides in waters of the Iberian Douro River estuary and risk assessment of environmentally relevant mixtures using theoretical approaches and Artemia salina and Daphnia magna bioassays. **Ecotoxicol. Environ. Safety**., v. 145, p. 126-134, 2017.

DA SILVA, M.B. et al. Effects of dietary exposure to herbicide and of the nutritive quality of contaminated food on the reproductive output of Daphnia magna. **Aquatic Toxicology**, v. 179, p. 1-7, 2016.

DONEGÁ, M.H. et al. Avaliação ecotoxicológica e sensibilidade do amendoim (*Ara-*

chis hypogaea) a herbicidas. **Ciência e Cultura**, v. 11, n. 2, p. 51-61, 2015.

EDGE, C.B. et al. Compensatory indirect effects of an herbicide on wetland communities. **Science of the Total Environment**., v. 718, e137254, 2020.

ENFIELD, C. G.; YATES, S. R. Organic Chemical transport to groundwater. In: CHENG, H. H. (Ed.) **Pesticides in the soil environment:** Processes, impacts, and modeling. 2.ed. Madison: Soil Science Society of America, 1990. p.271-302.

FAIRCHILD, J. F. et al. Comparative sensitivity of *Selenastrum capricornutum* and *Lemna minor* to sixteen herbicides. **Archives Environ. Contam.** Toxicol, v. 32, n. 4, p. 353-357, 1997.

FARRÉ, D.; BARCELÓ, D. Toxicity testing of wastewater and sewage sludge by biosensors, bioassays and chemical analysis. **Trends Analitical Chemistry**, v. 22, p. 299-310, 2003.

FERRACINI, V. L. et al. Método para a determinação de hexazinone e tebutiuron em água. **Química Nova**, v. 28, n. 3, p. 380-382, 2005.

FILLOLS, E. et al. Combining weed efficacy, economics and environmental considerations for improved herbicide management in the Great Barrier Reef catchment area. **Science of the Total Environment**, 2020. *In press*.

FISKESJÖ, G. The Allium test in wastewater monitoring. **Environmental toxicology and water quality**, v. 8, n. 3, p. 291-298, 1993.

FLORÊNCIO, T. et al. Bioindicadores neotropicais de ecotoxicidade e risco ambiental de farmâcos de interesse para aquicultura. **Bol. Inst. Pesca**., v. 40, n. 4, p. 569-576, 2014.

FLURY, M. Experimental evidence of transport of pesticides through field soils – a review. **J. Environmental Quality**., v. 25, p. 25-45, 1996.

GARLICH, N. et al. Diquat associated with copper sources for algae control: Efficacy and ecotoxicology. **J. Environ. Sci. Health., Part B**, v. 51, n. 4, p. 215-221, 2016.

GISH, T. J. et al. Herbicide leaching under tilled and no-tilled fields. **Soil Science Society of America Journal**, v.59, p.895-901, 1995.

HENARES, M.N.P. et al. Toxicidade aguda e efeitos histopatológicos do diquate na brânquia e no fígado do piauçu (*Leporinus macrocephalus*). **Pesticidas: R. Ecotoxicol. e Meio Amb**., v. 17, p. 107-116, 2007.

HENARES, M.N.P. et al. Toxicidade aguda e histopatologia do herbicida reward® na brânquia e no fígado do pacu (*Piaractus mesopotamicus*). **J. Braz. Soc. Ecotoxicol**., v. 3, n. 1, p. 41-45, 2008.

HENARES, M.N.P. et al. Toxicidade aguda e efeitos histopatológicos do herbicida diquat na brânquia e no fígado da tilápia nilótica (*Oreochromis niloticus*). **Acta Sci. Biol. Sci**., v. 30, n. 1, p. 77-82, 2008.

HENARES, M.N.P. et al. Eficácia do diquat no controle de *Hydrilla verticillata*, *Egeria densa* e *Egeria najas* e toxicidade aguda para o guaru (*Phallocerus caudimaculatus*), em condições de laboratório. **Planta Daninha**, v. 29, n. 2, p. 279-285, 2011.

HIDALGO, C. et al. Improved coupled-column liquid chromatographic method for the determination of glyphosate and aminomethylphosphonic acid residues in environmental waters. **J. Chromat. A**., v. 1035, p. 153-157, 2004.

HOU, X. et al. L. Ascorbic acid induced atrazine degradation. J**. Hazardous Materials**., v. 327, n. 5, p. 71-78, 2017.

IBAMA. **Relatórios de comercialização de agrotóxicos**. 2019. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=594&Itemid=5 4>. Acesso em: 25 Jan 2020.

JOHNSON, D.H.; TALBERT, R.E. Cotton (*Gossypium hirsutum*) response to mazaquin and imazethapyr soil residues. **Weed Science**, v. 44, n. 1, p. 156-161, 1996.

KHAN, P.M.; ROY, K.; BENFENATI, E. Chemometric modeling of *Daphnia magna* toxicity of agrochemicals. **Chemosphere**, v. 224, p. 470-479, 2019.

KIELAK, E. et al. Phytotoxicity of Roundup Ultra 360 SL in aquatic ecosystems: Biochemical evaluation with duckweed (*Lemna minor* L.) as a model plant. **Pestic. Biochem. Physiol**., v. 99, n. 3, p. 237–243, 2011.

KILBRIDE, K.M.; PAVEGLIO, F.L.; GRUE, C.E. Control of smooth cordgrass with Rodeo® in a southwestern Washington estuary. **Wildlife Society Bulletin**, p. 520-524, 1995.

KOAKOSKI, G. et al. Cortisol response in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* L., following acute exposure to a glyphosate-based herbicide. **Environmental Sciences**, v. 1, n. 1, p. 25-32, 2013.

LEWIS, M.; THURSBY, G. Aquatic plants: Test species sensitivity and minimum data requirement evaluations for chemical risk assessments and aquatic life criteria development for the USA. **Environmental Pollution**, v. 238, p. 270-280, 2018.

LORENTE, C. et al. Impacts of agricultural irrigation on nearby freshwater ecosystems: The seasonal influence of triazine herbicides in benthic algal communities. **Science of the Total Environment**, v. 499, p. 533–545, 2015.

LOUREIRO, S.; SOARES, A. M. V. M.; NOGUEIRA, A. J. A. Terrestrial avoidance behaviour tests as screening tool to assess soil contamination. **Environmental pollution**, v. 138, n. 1, p. 121-131, 2005.

MA, J. et al. Toxicity of 40 herbicides to the green alga *Chlorella vulgaris*. **Ecotoxicol. Environ. Safety**., v. 51, p. 128-132, 2002.

MA, J. et al. Toxicity assessment of 40 herbicides to the green alga *Raphidocelis subcapitata*. **Ecotoxicol. Environ. Safety**., v. 63, p. 456-462, 2006.

MANCUSO, M. A. C.; NEGRISOLI, E.; PERIM, L. Efeito residual de herbicidas no solo ("Carryover"). **Rev. Brasil. Herb**., v. 10, n. 2, p. 151-164, 2011.

MANSANO, A.S. et al. Toxicity of copper oxide nanoparticles to neotropical species *Ceriodaphnia silvestrii* and *Hyphessobrycon eques*. **Environmental Pollution**, v. 243, p. 723-733, 2018.

MELO, L.E.L. et al. Developing the gastropod *Pomacea lineata* (Spix, 1827) as a toxicity test organism. **Hidrobiologia**, v. 429, n. 1-3, p. 73-78, 2000.

MESNAGE, R. et al. Transcriptome profiling of the fungus *Aspergillus nidulans* exposed to a commercial glyphosate-based herbicide under conditions of apparent herbicide tolerance. **Environ. Research,** v. 182, e109116, 2020.

MORETON, M.L. et al. Toxicity of the aquatic herbicide, reward®, on the fathead minnow with pulsed-exposure proteomic profile. **Comp. Biochem. Physiol. Part D: Genomics and Proteomics**., v. 33, e100635, 2020.

NAKAGOME, F. K.; NOLDIN, J. A.; RESGALLA JR, C. Toxicidade aguda e análise de risco de herbicidas e inseticidas utilizados na lavoura do arroz irrigado sobre o cladócero *Daphnia magna*. **Pesticidas: R. de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, v. 16, 2006.

NEDELKOSKA, T. V.; LOW, G. K .C. High-performance liquid chromatographic determination of glyphosate in water and plant after pre-column derivatisation with 9-fluorenylmethyl chloroformate. **Analytica Chimica Acta**., v. 551, p. 145-153, 2004.

NEVES, M. et al. Biochemical and populational responses of an aquatic bioindicator species, *Daphnia longispina*, to a commercial formulation of a herbicide (Primextra® Gold TZ) and its active ingredient (S-metolachlor). **Ecological indicators,** v. 53, p. 220-230, 2015.

NIEKAMP, J. W.; JOHNSON, W. G. Weed management with sulfentrazone and flumioxazin in no-tillage soybean (*Glycine max*). **Crop Protection**, v. 20, n. 3, p. 215-220, 2001.

OECD, **Guideline for testing of chemicals:** *Lemna* **sp. Growth innibition test.** Organization for economic coorperation and development. 2002.

OLIVEIRA-FILHO, E.C.; PAUMGARTTEN, J. R. Toxicity of Euphorbia milii latex and niclosamide to snails and nontarget aquatic species. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 46, n. 3, p. 342-350, 2000.

OLIVEIRA JR, R. S. Conceitos importantes no estudo do comportamento de herbicidas no solo. **Boletim Informativo – Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n. 2, p.9- 13, 2001.

OLIVEIRA, M. F. Comportamento de Herbicidas no Ambiente. In: OLIVEIRA JR, R. S.; CONSTANTIN, J. **Plantas Daninhas e seu Manejo.** Guaíba: Agropecuária, Porto Alegre, RS, 2001, 362p.

PAPINI, S.; ANDRÉA, M. M. Dissipação do glifosato em solo e bioacumulação em minhocas. In: RESUMOS DA FERTBIO 2002. **Resumos**... SBCS, Rio de Janeiro. CD-Rom. 2002.

PAPINI, S. T. et al. Influence of substrate on bioaccumulation of 14C-paraquat in compost worms Eisenia fetida. **Journal of Environmental Science and Health**, v. 41, p. 523-530, 2005.

PEREIRA, J.L.; MENDES, C.D.; GONÇALVES, F. Short-and long-term responses of *Daphnia* spp. to propanil exposures in distinct food supply scenarios. **Ecotox. Environ. Safety**, v. 68, n. 3, p. 386-396, 2007.

PEREIRA, J. L. et al. Gene transcription in *Daphnia magna*: effects of acute exposure to a carbamate insecticide and an acetanilide herbicide. **Aquatic Toxicol**., v. 97, n. 3,

p. 268-276, 2010.

PEREIRA, P.C. et al. Acute Toxicity of Herbicides and Sensibility of Aquatic Plant *Wolffia brasiliensis* as a Bioindicator Organism. **Planta Daninha**, v. 37, e019201636, 2019.

PERES, L. R. S.; VECHIA, J. F.; CRUZ, C. Hormesis effect of herbicides subdoses on submerged macrophytes in microassay conditions. **Planta Daninha**, v. 35, e017165857, 2017.

PITELLI, R. A. et al. **Ecotoxicologia, Impacto Ambiental e Corrosividade de Fontes Cloradas e Revestimento a Base de Zinco para o Controle de Mexilhão Dourado**. 1. ed. Jaboticabal: Fundação de Apoio a Pesquisa, Ensino e Extensão - Funep, 2019.

PIYATIRATITIVORAKUL, P.; RUANGAREERAT, S.; VAJARASATHIRA, B. Comparative toxicity of heavy metal compounds to the juvenile golden apple snail, Pomacea sp. **Fres. Environ. Bull**., v. 15, n. 5, p. 379-384, 2006.

PLIMMER, J. R. Dissipation of pesticides in the environment. In: SCHNOOR, J. L. (Ed.). **Fate of pesticides and chemicals in the environment**. John Wiley & Sons: New York, 1992. p.79-90.

PRATA, F. et al. Glyphosate sorption and desorption in soils with different phosphorous levels. **Sci. Agric**., v. 60, n. 1, p. 175-180, 2003.

PROCÓPIO, S.O. et al. **Manejo de plantas daninhas na cultura da cana-de-açúcar**. Viçosa – MG: Universidade Federal de Viçosa, 2003.

PROENÇA, M. A.; OLIVEIRA, L. L. D. D.; ROCHA, O. Efeito tóxico do cobre sobre o crescimento da macrófita aquática Lemna minor. **Rev. Eletr. Fórum Amb. A. Paulista**., v. 8, n. 12, p. 196-207, 2012.

RAND, G. M.; PETROCELLI, S. R. **Fundamentals of aquatic toxicology**. HEMISPHE-

RE, 1985.

RAND, G. M. **Fundamentals of aquatic toxicology: effects, environmental fate and risck assessment**. Boca Raton, CRC press: USA, 1995.

RENNER, K. A.; MEGGIT, W. F.; PENNER, D. Effect of soil pH on imazaquin and imazethapyr adsorption to soil and phytotoxycity to corn (*Zea mays*). **Weed Science**, v. 36, n. 1, p. 78-83, 1988.

SADEGHI, A. M.; ISENSEE, A. R.; SHELTON, D. R. Effects of tillage on herbicide dissipation: a side-by-side comparason using microplots. **Soil Science**, v. 163, p. 883-890, 1998.

SALAZAR-LUGO, R. et al. Histopathological changes in gill, liver and kidney of neotropical fish *Colossoma macropomum* exposed to paraquat at different temperatures. **Environ. Toxicol. Pharmacol**., v. 31, p. 490-495, 2011.

SANTOS, E.A. et al. Atrazine levels in the Jaboticabal water stream (São Paulo State, Brazil) and its toxicological effects on the pacu fish *Piaractus mesopotamicus*. **Arh. Hig. Rada. Toksikol**., v. 666, p. 73-82, 2015.

SCOTT, C. et al. Catalytic improvement and evolution of atrazine chlorohydrolase. **Appl. Environ. Microbiol**., v. 75, p. 2184-2191, 2009.

SHIOGIRI, N.S. et al. Ecotoxicity of glyphosate and aterbane® br surfactant on guaru (*Phalloceros caudimaculatus*). **Acta Scient. Biol. Sciences**, v. 32, p. 285-289, 2010.

SHIOGIRI, N.S. et al. Acute exposure of a glyphosate-based herbicide affects the gills and liver of the Neotropical fish, *Piaractus mesopotamicus*. **Environ. Toxicol. Pharmacol**., v. 34, p. 388-396, 2012.

SHIOGIRI, N. S.; CRUZ, C.; FERNANDES, M. N. Antimicrobianos utilizados no controle de doenças de peixe em sistemas de cultivo. In: TAVARES-DIAS, M.; MARIA-

NO, W. S. (Org.). **Aquicultura no Brasil: novas perspectivas**. Editora Pedro & João: São Carlos, 2015.

SILVA, A.F. et al. Ecotoxicidade de herbicidas para a macrófita aquática (*Azolla caroliniana*). **Planta Daninha**, v.30, n.3, p.541-546, 2012.

SOLOMON, K. R. et al. Effects of atrazine on fish, amphibians, and aquatic reptiles: A critical review. **Crit. Rev. Toxicol**., v. 38, n. 9, p. 721-772, 2008.

SUN, C. et al. To evaluate the toxicity of atrazine on the freshwater microalgae *Chlorella sp*. using sensitive indices indicated by photosynthetic parameters. **Chemosphere**, v. 244, e125514, 2020.

TRUHAUT, R. Ecotoxicology: Objectives, Principles and Perspectives. **Ecotoxicology Enviromental Safety**, v. 1, p.151-173, 1977.

TUFFI SANTOS, L .D. et al. Exsudação radicular do glifosato por *Brachiaria decumbens* e seus efeitos em plantas de eucalipto e na microbiana do solo. **Planta daninha**, v. 23, n. l, p. 143-152, 2005.

USEPA (United States Environmental Protection Agency). **Methods for mensuring the acute toxicity of effluents and receiving waters to freshwater and marine organisms**. 5 ed. EPA: Washington, 2002.

VECHIA, J. D. et al. Macrophyte bioassay applications for monitoring pesticides in the aquatic environment. **Planta Daninha**, v. 34, n. 3, p. 597-603, 2016.

VELINI, E.D. Comportamento de herbicidas no solo. In: SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE MANEJO DE PLANTAS DANINHAS EM HORTALIÇAS. 1992. Botucatu. **Resumos**... Botucatu, 1992. p. 44-64.

VENTURINI, F. P.; CRUZ, C.; PITELLI, R. A. Toxicidade aguda do sulfato de cobre e do extrato aquoso de folhas secas de nim para o caramujo (*Pomacea canaliculata*). **Acta**

Scient. Biol. Sciences, v.30, p.179-184, 2008.

VILLARROEL, M. J. et al. Acute, chronic and sublethal effects of the herbicide propanil on *Daphnia magna*. **Chemosphere**, v. 53, n. 8, p. 857-864, 2003.

VILLARROEL, M. J. et al. Caloric content of *Daphnia magna* as reflect of propanil stress during a short-term exposure and its relationship to long-term responses. **Environ. Toxicol. Pharmacol**., v. 35, n. 3, p. 465-472, 2013.

WANG, Y. et al. Toxicity assessment of 45 pesticides to the epigeic earthworm *Eisenia fetida*. **Chemosphere,** v. 88, p. 484-491, 2012.

XING, H. et al. Acute and subchronic toxic effects of atrazine and chlorpyrifos on-common carp (*Cyprinus carpio* L.): Immunotoxicity assessments. **Fish & Shellfish Immunology**, v. 45, n. 2, 2015.

XU, Y. et al. Effects of glyphosate-based herbicides on survival, development and growth of invasive snail (*Pomacea canaliculata*). **Aquatic Toxicol**., v. 193, p. 136-143, 2017.

ZAGATTO, P. A.; BERTOLETTI, E. **Ecotoxicologia Aquática – Princípios e Aplicações**. Editora Rima: São Carlos, 2006.

ZHANG, Y. et al. A trigger mechanism of herbicides to phytoplankton blooms: From the standpoint of hormesis involving cytochromeb559, reactive oxygen species and nitric oxide. **Water Research.**, v. 173, e115584, 2020.

CAPÍTULO 15

ESTRESSE HÍDRICO NO MANEJO DE PLANTAS DANINHAS

Dagoberto Martins[1]
Clebson Gomes Gonçalves[2]
Antônio Carlos da Silva Júnior[2]
Maria Renata Rocha Pereira[3]
Sidney Roberto De Marchi[4]

[1]Prof. Associado Universidade Estadual Paulista/UNESP. [2]Dr. em Agronomia Universidade Estadual Paulista/UNESP. [3]Profa. Dra. FATEC/Silvicultura. [4]Prof. Dr. Universidade Federal do Mato Grosso/UFMT.

1 FISIOLOGIA DO ESTRESSE HÍDRICO EM PLANTAS DANINHAS

O estresse é, na maior parte das definições, um desvio significativo das condições ótimas para a vida, o que origina mudanças e respostas em todos os níveis do organismo. Estas respostas são inicialmente reversíveis, mas podem tornar-se permanentes. Mesmo se o acontecimento causador de estresse for temporário, a vitalidade da planta diminui com o prolongar do estresse (LARCHER, 2006).

Entre os fatores climáticos causadores de estresse para as plantas, há a radiação excessivamente elevada ou insuficiente, temperatura que também pode ser excessiva ou insuficiente, podendo esta última ser acompanhada por geada, gelo ou neve, precipitação deficiente, seca e ventos fortes. No solo, podem ocorrer concentrações elevadas de sais, ou deficiências minerais, acidez ou alcalinidade excessiva, solos instáveis, areias movediças, deficiência em oxigênio nas zonas em que os solos são muito compactos ou estão encharcados (LARCHER, 2000).

De acordo com Lima (1995), a eficiência no uso da água pode ser entendida como um eficiente mecanismo evolutivo pelo qual a planta adquire maior elasticidade para enfrentar possíveis déficits hídricos. A resposta ao estresse pode ser vista como uma situação de competição entre o esforço da planta em adaptar-se e os processos potencialmente letais no protoplasma. Dessa forma, a dinâmica do estresse compreende a perda de estabilidade, um componente destrutivo ("diestresse"), bem como a promoção da resistência e do restabelecimento ("euestresse") (LARCHER, 2000).

De acordo com Bray (2007), as espécies possuem diferentes comportamentos ao déficit hídrico do solo e aos mecanismos de tolerância devido às respostas programadas no genoma de cada espécie, e estas respostas estão ligadas à prevenção ou ao alívio do dano celular, ao restabelecimento da homeostase e à retomada do crescimento (HARFOUCHE et al., 2014).

Dentre estas respostas, vale ressaltar o desenvolvimento de sistemas radiculares mais profundos e extensos para aumentar a captação de água, ocorrendo na maioria das espécies arbóreas (NGUYEN; LAMANT, 1989); modificação de características foliares com alteração da morfologia, como o aumento da cera cuticular (HADLEY; SMITH, 1990); redução da área foliar, aumento da abscisão foliar devido à maior concentração de ácido abscísico e diminuição da condutância estomática

(MUNNÉ-BOSCH; ALEGRE, 2004).

Segundo Harfouche et al. (2014), o acúmulo ativo de solutos em vacúolos também é uma resposta fisiológica comum à seca, salinidade e estresse pelo frio, devido ao desvio do fotossintato, que seria utilizado na produção de glicose e responsável pelo crescimento da planta, para a tolerância e/ou a aclimatação destas aos diferentes estresses, podendo ser esta uma das razões pelas quais os custos metabólicos da tolerância ao estresse podem ter impactos negativos no crescimento.

A área foliar, de acordo com Benincasa et al. (1976), é em geral um excelente indicador da capacidade fotossintética de uma planta, e sua determinação é muito importante em estudos de nutrição, competição e relações solo-água-planta. Além disso, é importante como índice de crescimento da planta e está estreitamente correlacionada ao acúmulo de matéria seca, metabolismo, produção, maturação e qualidade da cultura. Vários trabalhos têm mostrado decréscimos no índice de área foliar e no rendimento da matéria seca com o aumento do déficit hídrico, como foi relatado por Millar e Gardner (1972).

Outro responsável pelo impacto negativo no crescimento de plantas em solos com baixa disponibilidade de água é o fechamento parcial ou total dos estômatos, que é resultado de vários processos metabólicos, limitando a perda de água e, como consequência, a fixação de CO_2 (NOBEL, 1974). A associação entre déficit hídrico e fechamento estomático restringe fortemente a assimilação de carbono, pois há um conflito entre a conservação da água pela planta e a taxa de assimilação de CO_2 para produção de carboidratos (TAIZ; ZEIGER, 2013). Nesse contexto, o controle estomático tem sido indicado como a fração principal da limitação total da fotossíntese (CHAVES, 1991). Ajustes internos não estomáticos têm sido observados, incluindo redução da atividade de enzimas do ciclo de Calvin e Benson (KICHEVA et al., 1994), inibição do transporte de fotoassimilados (MASOJIDEK et al., 1991) e alterações do estoque de carboidratos nas células (QUICK et al., 1992).

A condutância estomática pode ser entendida como mecanismo fisiológico que as plantas terrestres vasculares possuem para o controle da transpiração (JARVIS; MCNAUGHTON, 1986). Segundo Lima (1993), a epiderme das folhas encontra-se normalmente envolvida por uma cutícula relativamente impermeável, tanto ao vapor d'água quanto ao gás carbônico, mas contém grande quantidade de estômatos, cuja resposta, mediante a regulação da condutância estomática, controla

a transpiração da folha e é influenciada pela: luz, concentração de gás carbônico atmosférico, umidade e temperatura. Para Ludlow (1980), a condutância estomática é proporcional à transpiração, à fotossíntese líquida e ao potencial da água na folha. O funcionamento dos estômatos constitui um comportamento fisiológico. Quando abertos, permitem a assimilação de gás carbônico e, fechando-se, conservam água e reduzem o risco de desidratação (TENHUNEN et al., 1987). Segundo Barlow (1983), pela regulação da demanda transpiratória das folhas, a condutância estomática influenciará diretamente o potencial de água da planta. Dessa forma, o potencial de água das folhas, por sua vez, também influencia a condutância estomática, particularmente durante as condições de deficiência hídrica. Entre os fatores ambientais, a luz, a umidade do ar, a concentração de gás carbônico, o potencial de água da folha e a temperatura influem significativamente na condutância estomática (SCHULZE et al., 1987; TENHUNEN et al., 1987).

Com relação à penetração de herbicidas, os estômatos podem potencialmente estar envolvidos de duas formas. Primeiro, a cutícula sobre as células-guarda parece mais fina e mais permeável a substâncias do que a cutícula sobre as outras células epidérmicas. Em segundo lugar, a solução pulverizada poderia, em tese, mover-se através do poro de um estomático aberto, para dentro da câmara estomática, e daí para o citoplasma das células do parênquima foliar (DEVINE, 1990; BUKOVAC et al., 1990; PROCÓPIO et al., 2003).

Embora sejam encontrados trabalhos que, avaliando genótipos diferentes de uma mesma espécie com relação à absorção de um herbicida, tenham demonstrado correlação direta entre frequência estomática e sensibilidade, é possível que a menor espessura da cutícula sobre as células-guarda seja o fator de maior importância neste caso e não propriamente o aumento da absorção pela penetração direta pelos estômatos (TAIZ; ZEIGER, 2013).

A penetração estomática é mais um processo de fluxo em massa do que um processo de difusão. Pontos importantes que devem ser considerados em relação à absorção é a tensão de superfície do líquido, o ângulo de contato produzido pelo líquido na superfície da planta e a morfologia e a composição química da parede do poro estomático. A penetração pelos poros estomáticos pode ocorrer se a tensão superficial da solução pulverizada for tal que o molhamento completo ocorre. Neste caso, a tensão de superfície do líquido é menor do que a tensão crítica da superfície

da folha (SCHÖNHERR; BUCKOVAC, 1972).

Oliveira Jr. e Bacarin (2001) concluíram que a penetração estomática de gotas pulverizadas a partir de uma solução baseada em água, mesmo com a adição de surfactantes, é provavelmente um processo de menor importância em aplicações de herbicidas no campo. A infiltração pelos estômatos, portanto, não é possível a menos que a tensão superficial da solução pulverizada seja significativamente reduzida pelo uso de surfactantes na formulação ou no tanque. A maioria dos surfactantes atualmente em uso atua aumentando a penetração cuticular e não consegue reduzir a tensão superficial adequadamente para permitir a infiltração estomática. No entanto, o desenvolvimento de surfactantes à base de organossilicones proporcionou um avanço nesse ponto. Estes são capazes de reduzir a tensão superficial ao ponto de a infiltração pelo estômato ocorrer (FERREIRA et al., 2002; PROCÓPIO et al., 2003).

Dois tipos diferentes de mecanismos de aumento na absorção de ingredientes ativos foram observados para os surfactantes à base de organossilicones. Em primeiro lugar, estes podem induzir um fluxo em massa da solução pulverizada através do poro estomatal. Além disso, podem, direta ou indiretamente, aumentar a penetração cuticular. Alguns trabalhos têm demonstrado que este tipo de surfactante pode aumentar inclusive a translocação relativa do produto aplicado (KNOCHE, 1994).

Pesquisas demonstrando o efeito do déficit hídrico no solo sobre a fitotoxidade de herbicidas aplicados via foliar estão focadas na absorção, translocação e metabolismo desses herbicidas (PEREGOY et al., 1990; MORRISON et al., 1995; LEVENE; OWEN, 1995). Boydston (1990) verificou menor controle de *Setaria viridis* (L.) P. Beauv. com sethoxydim quando esta planta era submetida a um menor teor de água no solo. Da mesma forma, Kells et al. (1984) verificaram menor absorção foliar de fluazifop-p-butil devido à baixa umidade no solo.

Devido ao fato de os sistemas de produção nem sempre estarem sujeitos a ótimas condições hídricas e sofrerem com plantas daninhas, é importante o levantamento destas informações a fim de se efetuar melhor manejo no controle químico desta espécie.

2 MODIFICAÇÕES MORFOFISIOLÓGICAS DAS PLANTAS EM CONDIÇÕES DE DÉFICIT HÍDRICO

A seca é o estresse abiótico mais limitante e severo para as culturas agrícolas, pois limita o crescimento e a produtividade das plantas em todo o mundo (MANAVALAN et al., 2009; BALARDIN et al., 2011; SADEGHIPOUR; ABBASI, 2012; SILVA et al., 2013), principalmente em razão da predominância do cultivo sequeiro em grandes áreas nas regiões produtoras. Esse fato causa elevados riscos no processo produtivo, pois nos períodos de safra e entressafra as ocorrências de períodos prolongados de estiagem têm sido cada vez mais frequente (BALARDIN et al., 2011).

A restrição de água no solo desencadeia diversos desequilíbrios entre a sua absorção pela raiz e a transpiração das folhas (DOGAN et al., 2007; ASHRAF, 2010; ASHRAF; HARRIS, 2013; AFZAL et al., 2014). Salienta-se que diferentes espécies têm apresentado complexos mecanismos para enfrentar a baixa quantidade de água no solo. Estudos recentes têm destacado diferentes adaptações fisiológicas que, na maioria das vezes, têm efeitos deletérios no crescimento e no rendimento das plantas, tais como: comprometimento metabólico da maquinaria fotossintética, dano oxidativo, alterações hormonais e acúmulo de proteínas relacionadas ao estresse, o que leva à interrupção dos processos fisiológicos e bioquímicos nas vias celulares e moleculares (SILVA et al., 2010; ASHRAF; HARRIS, 2013; GALMÉS et al., 2013).

Modificações anatômicas também são processos adaptativos específicos das plantas sob estresse hídrico, como exemplos têm-se a redução da densidade estomática, modificações na arquitetura e diminuição do número de folhas, diminuição da expansão foliar, alteração da relação xilema/floema, redução dos diâmetros dos vasos do xilema, diâmetros das células parenquimáticas, aumento do tecido vascular e espessura da parede celular (GUERFEL et al., 2009; MAKBUL et al., 2011; TRIPATHI et al., 2016; GONÇALVES et al., 2017).

Todos esses processos desencadeados por plantas que se desenvolveram em regime de seca podem afetar, direta ou indiretamente, a seletividade dos herbicidas a culturas agrícolas e/ou à eficácia dos herbicidas no controle das plantas daninhas, e que são fundamentais na agricultura atual, uma vez que é necessário um controle adequado das plantas daninhas para garantir o desenvolvimento e a

produtividade das culturas.

Em um estudo conduzido para avaliar a seletividade de plantas de soja submetidas a diferentes restrições de água no solo, Gonçalves (2017) observou que sob escassez hídrica as plantas de soja apresentavam menor fitointoxicação visual quando submetidas à pulverização do herbicida chlorimuron-ethyl e fomesafen (Tabela 1).

Normalmente, a seletividade dos herbicidas é uma característica que permite controlar as plantas daninhas sem causar danos à cultura de interesse. No entanto, é possível que modificações anatômicas, fisiológicas e bioquímicas, devido a estresses abióticos, possam afetar as características das plantas (SILVA et al., 2010; GONÇALVES et al., 2017), por meio de redução da absorção foliar ou radicular, baixa translocação ou metabolização do produto devido maior atividade enzimática em razão das condições de estresse.

Peregoy et al. (1990) relataram que, sob estresse hídrico, a cutícula da folha desidrata e pode reduzir a absorção de herbicidas, o que proporciona menor fitointoxicação à cultura. Ressalta-se, também, que algumas plantas são extremamente eficientes na desintoxicação de herbicidas por meios de atividades enzimáticas; assim, plantas que se desenvolvem sob restrição hídrica e que apresentam alta síntese de antioxidantes enzimáticos podem apresentar sensibilidade diferenciada aos diferentes grupos de herbicidas. Um exemplo claro são os herbicidas do grupo químico éter difenílico, que apresenta rápida desintoxicação pela enzima glutationa transferase (GSTs), sob alta síntese enzimática (SKIPSEY et al., 2005; BENEKOS et al., 2010; DIXON et al., 2010; CUMMINS et al., 2011).

Tabela 1. Valores médios verificados para a fitointoxicação da soja, submetidas à aplicação do chlorimuron-ethyl e fomesafen.

Manejo Hídrico	Chlorimuron-ethyl - Fitointoxicação (%)			
(MPa)	3 DAA	7 DAA	14 DAA	21 DAA
-0,03	9,13 a	16,63 a	18,38 a	11,00 a
-0,07	4,88 b	13,25 b	11,38 b	5,25 b
-0,5	1,00 c	6,88 c	2,75 c	1,00 c
	Fomesafen - Fitointoxicação (%)			
-0,03	5,75 a	13,50 a	9,00 a	5,00 a
-0,07	0,75 b	5,75 b	2,75 b	0,87 b
-0,5	1,00 b	5,50 b	2,25 b	0,50 b

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey (P<0,05). DAA= dias após a aplicação.

Fonte: GONÇALVES (2017).

2.1 Adaptações morfoanatômicas

A sobrevivência das plantas durante uma restrição hídrica requer mecanismos através dos quais as plantas possam perceber a falta de água no solo e passe a regular rapidamente sua fisiologia para compensar essa condição de estresse (TURNER, 1997). Portanto, o principal mecanismo através dos quais as plantas percebem a restrição de água no solo é sinalizado pelo fechamento estomático (Figura 1), sendo este a primeira e imediata resposta ao déficit hídrico que regula a redução das perdas de água pela fotorrespiração (POLIZEL et al., 2011; GONÇALVES et al., 2017). Ressalta-se que a redução da densidade estomática pode melhorar também a tolerância à seca (TRIPATHI et al., 2016).

Entretanto, esta condição de fechamento dos estômatos também é relatada como sendo a principal causa da diminuição da fotossíntese, devido às baixas taxas de assimilação de CO_2 que limitam o crescimento das plantas (FLEXAS et al., 2004; PAIVA et al., 2005; OHASHI et al., 2006; GALMÉS et al., 2013; AFZAL et al., 2014; MAK et al., 2014).

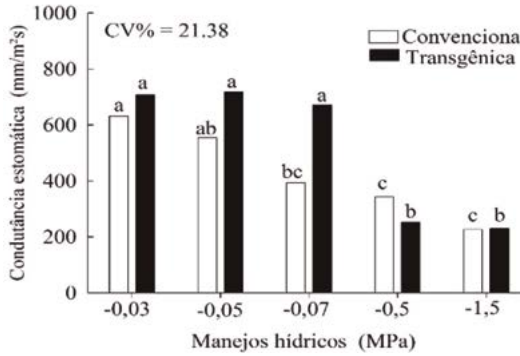


Figura 1. Efeito do déficit hídrico sobre condutância estomática (mm/m2s) em cultivares de soja convencional e transgênica.
Fonte: GONÇALVES et al. (2017).

A redução da área foliar das plantas também ocorre devido à escassez hídrica como sendo uma resposta à falta de água no solo (GONÇALVES et al., 2017), como pode ser observado na Figura 2. No entanto, esta redução é um fator limitante ao crescimento das plantas, pois compromete a biomassa da parte aérea e, consequentemente, a produtividade das plantas (MAK et al., 2014; GONÇALVES et al., 2017).

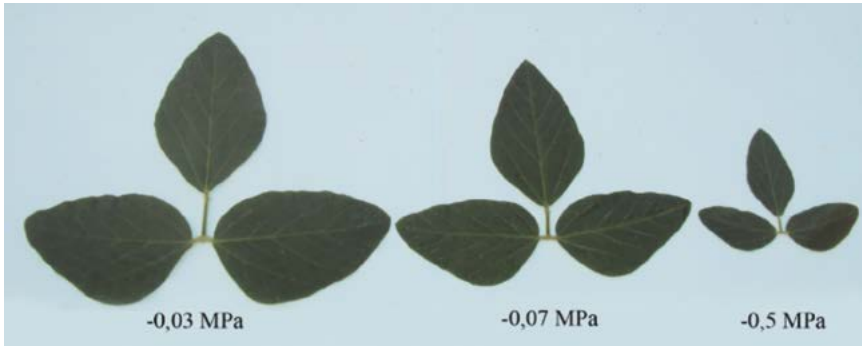


Figura 2. Efeito do déficit hídrico sobre área foliar em plantas de soja.
Fonte: GONÇALVES et al. (2017).

Os caracteres anatômicos e morfológicos da planta são gravemente afetados pelo déficit hídrico, tais como as modificações das células parenquimáticas (GONÇALVES et al., 2017). As Plantas sob déficit hídrico apresentam redução da lâmina foliar, pois menor quantidade de espaços intercelulares permite que as células fiquem mais justapostas (Figuras 3 a, b, c). Essa redução de espaços intercelulares no mesófilo representa uma vantagem adaptativa, pois células mais próximas podem representar uma adaptação à escassez hídrica, devido ao aumento da superfície de contato das células, o que pode facilitar a captura de energia da luz e elementos gasosos, que são necessários para a manutenção dos processos fisiológicos e bioquímicos das plantas (POLIZEL et al., 2011).

Ressalta-se que parte dos tecidos foliares e da nervura central, que são formados por colênquima e esclerênquima, possuem funções protetoras que podem ter sua formação comprometida quando plantas sensíveis são submetidas a uma condição de restrição hídrica, dependendo do estádio fenológico em que se encontram (GONÇALVES et al., 2017), o que pode levar a uma desestruturação dos tecidos quando submetidas a um estresse severo (Figura 3c), tornando essas plantas mais vulneráveis a estresses bióticos e abióticos.

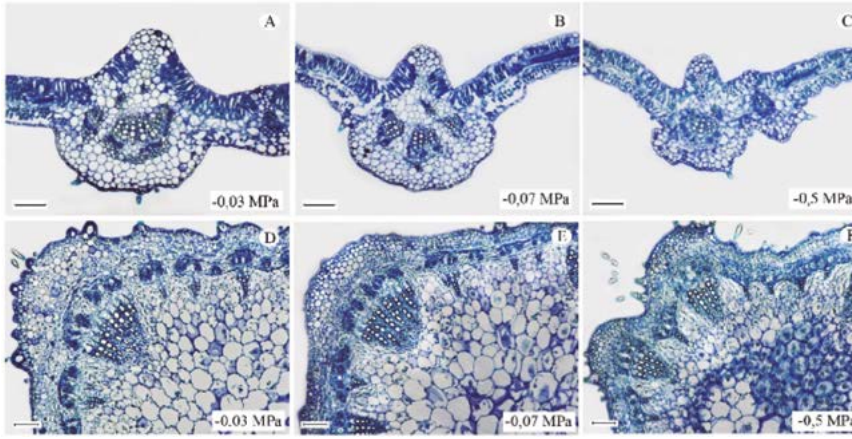
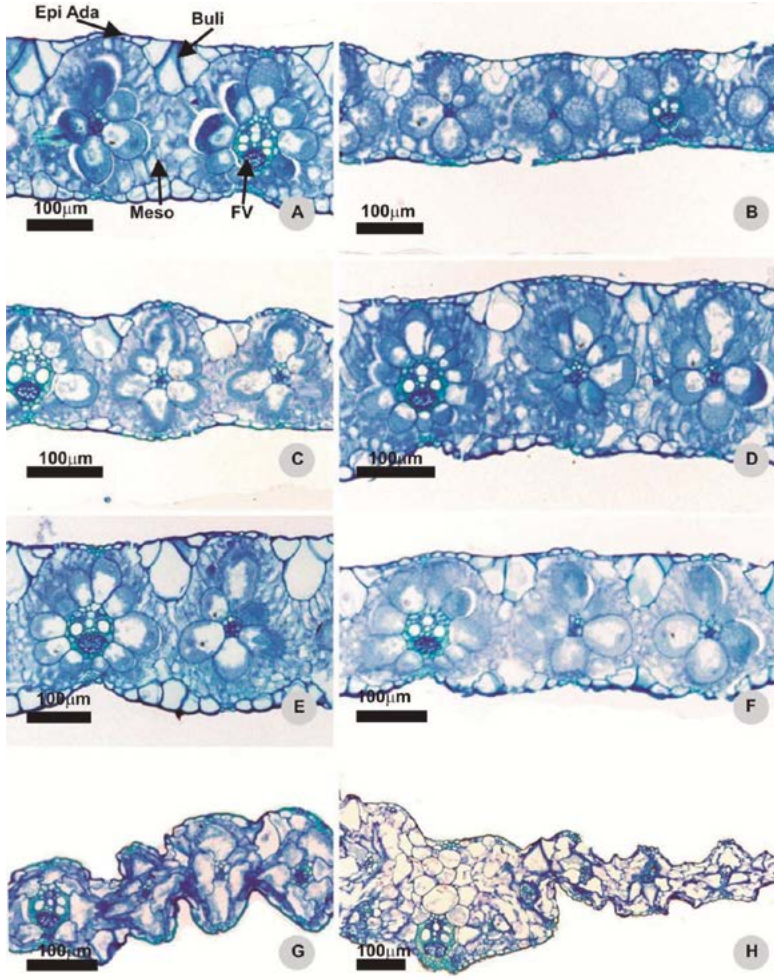


Figura 3. Secção transversal do Limbo foliar (A, B e C) - *Barra: 150 µm*, e do caule (D, E e F) - *Barra: 110 µm*, de soja, submetidas a diferentes potenciais hídricos no solo. **Fonte:** GONÇALVES et al. (2017).

Assim, como a anatomia das folhas, modificações caulinares também são observadas em plantas sob estresse hídrico (Figuras 3 d, e, f). Danos nos feixes do xilema e do floema, redução do tamanho das células e maior fragilidade do parênquima medular do caule são ocasionados principalmente por uma baixa pressão de turgescência nas células (GONÇALVES et al., 2017).

Em um outro estudo de anatomia (Figura 4), Pereira et al. (2017) verificaram que o estresse hídrico influenciou negativamente na eficiência do herbicida sethoxydim, bem como diminuiu todos os parâmetros fisiológicos das plantas de capim-braquiária [*Urochloa decumbens* (Stapf) R. D.]. A aplicação do herbicida ocasionou modificações anatômicas em plantas sem estresse hídrico (-0,03 MPa), como limitação no crescimento das células da epiderme e das células buliformes, e na espessura total das folhas. No entanto, nos tratamentos com estresse (-0,07 e -1,5 MPa), não houve diferenças na anatomia foliar; apenas ocorreu aumento na espessura total da folha, provavelmente reflexo das condições de estresse hídrico ao qual as plantas foram submetidas.



Buli = células epidérmicas boliformes; Epi Ada = células da epiderme adaxial; Meso = mesofilo homogêneo; VB = feixe vascular.

Figura 4. Secções transversais de folhas de Urochloa decumbens submetidas a potenciais hídricos de -1,5 MPa (A-B); -0,07 MPa (C-D) e -0,03 MPa (E-H), com aplicação de sethoxydim (B, D, F, H) e sem sethoxydim (A, C, E, G). (G-H) - folhas que apresentaram alta taxa de dano anatômico.
Fonte: Pereira et al. (2017).

O sistema radicular de plantas mantidas em condições de escassez hídrica também pode ser severamente afetado (Figura 5). As principais alterações observadas são: diminuição da massa seca do sistema radicular, redução do número de vasos do xilema das raízes, modificações morfológicas do exoderme e menor largura do córtex e dos feixes vasculares das raízes em plantas sob estresse (BAÑON et al., 2004; MAKBUL et al., 2011; GONÇALVES et al., 2018).

Deste modo, melhor tolerância à condição de escassez hídrica pode estar relacionada à melhor arquitetura das raízes, como: maior profundidade e ramificação, diâmetros do xilema, raiz com mais pelos radiculares, densidade e ângulo das raízes (FENTA et al., 2014; VADEZ et al., 2014; ALI et al., 2016). Essas características aumentam a área de superfície radicular, o que facilita a captação de água da solução do solo.

Figura 5 Sistema radicular de soja submetida a diferentes condições de déficit hídrico. **Fonte:** GONÇALVES et al. (2018).

2.2 Estresse oxidativo em plantas

Processos bioquímicos também são interrompidos pelo déficit hídrico, dando origem a espécies tóxicas reativas de oxigênio em excesso (ROS), tais como superóxido (O_2-), peróxido de hidrogênio (H_2O_2), oxigênio atômico e hidroxila (DEMIDCHIK, 2015). Na ausência de mecanismos de proteção, estas espécies de oxigênio são altamente reativas e interrompem gravemente o metabolismo normal por

dano oxidativo, que resulta em peroxidação lipídica (MADANI et al., 2010).

As plantas têm inúmeros mecanismos de defesa para resistir ao estresse oxidativo (GILL; TUTEJA, 2010). A ativação e a síntese de antioxidantes enzimáticos e compostos não enzimáticos são a primeira linha de defesa para lidar com a produção excessiva de ROS e sua eliminação. Existem muitas enzimas antioxidantes que mostram alta afinidade para ROS específicos. A SOD (EC 1.15.1.1) pode ser considerada a principal enzima antioxidante porque participa da primeira linha do sistema de defesa contra a toxicidade ROS. Esta enzima catalisa a desmutação de O_2• para H_2O_2 e O_2 em todos os compartimentos subcelulares, incluindo cloroplastos, mitocôndrias, núcleos, peroxissomas, citoplasma e apoplastos (GILL et al., 2015).

No entanto, o H_2O_2 é uma molécula altamente reativa e deve ser desintoxicada. A ascorbato peroxidase (APX, EC 1.11.1.11) desempenha um papel essencial na eliminação de H_2O_2, convertendo a produção excessiva de H_2O_2 em H_2O (SILVA et al., 2016). A CAT também percebe esta reação em diferentes compartimentos celulares, que é uma parte vital da defesa antioxidante (GARG; MANCHANDA, 2009).

Prolina, flavonoides e carotenoides são antioxidantes não enzimáticos que também desempenham papel importante na desintoxicação de ROS (AHMAD et al., 2010). A acumulação de prolina é uma das respostas mais comuns ao estresse hídrico nas plantas ao desempenhar um papel como osmoprotetor e um soluto compatível (TÜRKAN et al., 2005; SHARMA et al., 2012). De modo geral, o estresse oxidativo deve ser bem compreendido, pois este afeta a divisão, o alongamento e a diferenciação celular, resultando em danos no crescimento e no desenvolvimento das plantas (MECKEL et al., 1984; CABUSLAY et al., 2002; SHAO et al., 2008; DEMIRTAS et al., 2010; GONÇALVES, 2017).

3 CONTROLE QUÍMICO DE PLANTAS DANINHAS SOB ESTRESSE HÍDRICO

As plantas daninhas apresentam características de agressividade e, dentre estas, tem-se uma amplitude maior de adaptação a teores de umidade disponível no solo, quando comparados às culturas que passaram por diversos programas de melhoramento, as quais levaram às perdas destas características (PATTERSON, 1995).

Para o sucesso do controle das plantas daninhas, o uso de herbicidas torna-se uma opção a mais de manejo. A ação de um determinado herbicida pode ser reduzida em plantas sob déficit hídrico devido à menor retenção da calda pulverizada nas folhas, menor absorção e translocação, e a problemas no metabolismo do herbicida (SHANI, 1975)

Os herbicidas aplicados em pós-emergência são os mais prejudicados, pois com as mudanças morfofisiológicas, como um maior espessamento da cutícula, ocorre menor penetração do herbicida e, com isso, o mesmo fica sujeito às intempéries do ambiente, como a evaporação e a volatilização dos produtos aplicados (SILVA JR., 2018).

3.1 Glyphosate

O herbicida glyphosate é aplicado em pós-emergência da planta-alvo, sendo sua absorção basicamente foliar, e sua translocação dá-se pelo simplasto até o seu sítio de ação, onde ocorre a inibição da enzima 5-enolpiruvil-chiquimato-3-fosfato-sintase (EPSPs) e, consequentemente, a inibição da síntese de três aminoácidos essenciais: triptofano, fenilalanina e tirosina (DANIELE et al., 1997; DILL, 2005). A duração desse processo depende da idade em que a planta se encontra no momento da aplicação, das condições edafoclimáticas durante o seu desenvolvimento, além da concentração do herbicida sobre a planta (RUITER; MAINEN, 1998).

Chachalis et al. (2001) observaram que a baixa eficácia do glyphosate no controle *Brunnichia ovata* (Water) Shinners foi devido à cera epicuticular das folhas dessa espécie ser muito hidrofóbica. Monqueiro et al. (2004) também observaram ceras epicuticulares com altos níveis de compostos apolares em folhas de *Commelina benghalensis* L. Isso poderia afetar a absorção de herbicidas que apresentam baixo Kow (afinidade por óleo/água), como o glyphosate, por exemplo.

Quando o glyphosate é aplicado em plantas que apresentam cutículas hidratadas. a absorção do herbicida é favorecida. A redução dessa absorção por plantas com déficit hídrico é evidenciada, uma vez que a cutícula não se apresenta hidratada (MCALLISTTER; HADERLIE, 1985).

Os herbicidas, principalmente os sistêmicos, como o glyphosate, podem

apresentar eficiência reduzida em plantas que estão sob déficit hídrico, sendo que pode ocorrer menor translocação desses compostos até os sítios de ação (HINZ; OWEN, 1994; ABBOTT; STERLING, 2003).

Harrington e Miller (2005) observaram que o controle de plantas de *Ligustrum sinense* Lour., que se desenvolveram sob restrição hídrica do solo, pelo herbicida glyphosate, foi ineficiente. Tal fato foi relacionado ao comportamento fisiológico e morfológico das plantas decorrente da restrição hídrica. Chase e Appleby (1979) observaram que, em plantas de tiririca sob um potencial hídrico do solo de -0,8 MPa, a eficiência do glyphosate não foi reduzida, mas à -1,1 MPa o controle foi 50% menor do observado em plantas que se desenvolveram sob capacidade de campo.

Em plantas de aveia-louca (*Avena fatua* L.) e de *Urochloa panicoides* P. Beauv cultivadas sob condição severa de déficit hídrico (29% da capacidade de campo), o controle promovido pelo glyphosate não foi eficiente quando comparadas às plantas que se desenvolveram em condições de umidade do solo em 100% da capacidade de campo (ADKINS et al., 1998). Ahmadi et al. (1980) verificaram que, em condições de baixa umidade do solo, -3,7 MPa, apenas 15% a 20% do glyphosate aplicado foram absorvidos por plantas de *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. que se desenvolveram nesta condição hídrica do solo.

Também Silva Jr. (2018) estudou o efeito do glyphosate sobre plantas de capim-colonião [*Megathyrsus maximum* (L.) B.K. Simon & S.W. Jacobs], capim-braquiária [*Urochloa ruziziensis* (R. Germ. & Evrard) Crins], capim-massambará [*Sorghum halepense* (L.) Pers] e capim-colchão (*Digitaria nuda* Schumach.) submetidas a diferentes graus de estresse hídrico e registrou que a eficiência de controle do glyphosate estava relacionada ao grau de estresse hídrico a que as plantas foram submetidas, bem como dependia, ainda, do estádio vegetativo (4-6 folhas e 1- 2 perfilhos) e da espécie a ser controlada.

O capim-colonião foi mais bem controlado quando as plantas não estavam submetidas a estresse hídrico (-0,03MPa) e na dose de 540 g ha^{-1}. Já o capim-colchão foi totalmente controlado, independentemente do manejo hídrico do solo e do estágio de crescimento, e quanto maior foi o estresse (-1,5MPa), melhor foi o controle, inclusive com doses reduzidas de glyphosate (270 g ha^{-1}). Para as plantas de capim-massambará e capim-braquiária o controle foi pouco eficiente quando a restrição hídrica foi intensa (-1,5MPa), independentemente do estádio de cresci-

mento (SILVA JR., 2018).

3.2 Chlorimuron-ethyl e imazethapyr

Herbicidas do grupo químico dos inibidores da acetolactato sintase (ALS), como o chlorimuron-ethyl e o imazethapyr, foram aplicados sobre plantas (estádio de 4 a 6 folhas) de corda-de-viola [*Ipomoea grandifolia* (Dammer) O'Donell.], submetidas a déficit hídrico (-0,5 MPa). Os pesquisadores observaram que apenas o herbicida chlorimuron-ethyl não proporcionou controle satisfatório da planta daninha (44 %) sob esta intensidade de estresse (VITORINO; MARTINS, 2012), sendo que, sem o estresse hídrico, o controle subiu para 71%.

Em outro estudo com plantas de picão-preto (*Bidens pilosa* L.), no estádio de 4 a 6 pares de folhas, Vitorino et al. (2012) observaram que ambos os herbicidas apresentaram um controle não eficiente do picão-preto quando as plantas estavam submetidas a estresse hídrico (-0,5 MPa), 63 e 66% de controle para o chlorimuron-ethyl e imazethapyr, respectivamente, frente a 81 e 80% em condições sem estresse hídrico.

Já Vitorino et al. (2013) registraram em plantas de amendoim-bravo (*Euphorbia heterophylla* L.), também no estádio de 4 a 6 folhas, que tanto o herbicida chlorimuron-ethyl como o imazethapyr proporcionaram controles inferiores e ineficientes, 48 e 56 % de controle, respectivamente, quando comparados à condição sem estresse hídrico.

3.3 Fomesafen e lactofen

Herbicidas inibidores do protoporfirinogênio oxidase (PROTOX) também foram estudados por Vitorino e Martins (2012), Vitorino et al. (2012) e Vitorino et al. (2013). Verificou-se que para plantas de *I. gradifolia* (estádio de 4-6 folhas) um estresse de -0,5 MPa não afetou o controle da planta daninha pelos herbicidas fomesafen e lactofen, quando registraram 91 e 90%, respectivamente. Já, para as plantas de *B. pilosa* e *E. heterophylla*, o controle proporcionado por estes dois herbicidas foi

reduzido drasticamente nas duas espécies de plantas daninhas, *B. pilosa* com 40 e 55% de controle para o lactofen e fomesafem, respectivamente, e para *E. heterophylla* 62 e 68 %.

3.4 Fluazifop-p-butil, haloxyfop-methyl e sethoxydim

A aplicação de herbicidas inibidores da enzima acetil-CoA carboxilase (ACCase), como o fluazifop-p-butil, haloxyfop-methyl e sethoxydim, em plantas de capim-braquiária (*U. decumbens*), foi avaliada em dois estádios de crescimento (4-6 folhas e 2-3 perfilhos) e sob três condições de potencial hídrico no solo (-0,03, -0,07 e -1,5MPa), por Pereira et al. (2012a). No estádio de 4-6 folhas apenas os herbicidas fluazifop-p-butil e sethoxydim foram influenciados pelas condições de estresse hídrico impostas às plantas de capim-braquiária (-0,07 e -1,5MPa). Já, no estádio de 2-3 perfilhos, todos os três herbicidas proporcionaram controles inferiores quando da manutenção das plantas de capim-braquiária sob estresse hídrico.

Em outro estudo com a finalidade de controlar plantas de capim-colchão (*Digitaria horizontalis* Wild) sob diferentes potenciais hídricos no solo, em dois estádios de crescimento (4-6 folhas e 2-3 perfilhos), Pereira et al. (2012b) registraram que a eficiência de controle proporcionado pelos herbicidas fluazifop-p-butil, haloxyfop-methyl e sethoxydim foi reduzida apenas quando as plantas de capim-colchão estavam sob estresse hídrico (-0,07 e -1,5 MPa) e no estádio mais adulto de crescimento. Já, em uma pesquisa com plantas de capim-carrapicho (*Cenchrus echinatus* L.), verificou-se que estes três herbicidas tiveram seu controle afetado quando as plantas se encontravam apenas sob estresse hídrico severo (-1,5 MPa), o que evidencia respostas diferenciais, dependendo da espécie-alvo (PEREIRA et al., 2015b).

Pereira et al. (2015a) também estudaram diferentes potenciais de água no solo e o efeito destes herbicidas no controle de plantas de capim-de-galinha [*Eleusine indica* (L.) Gaertn], no estádio de 2-3 perfilhos. Para os herbicidas sethoxydim e fluazifop-p-butil, observou-se que o controle foi melhor quando as plantas apresentavam algum estresse hídrico (-0,07 e -1,5 MPa), em comparação às plantas mantidas sem restrição hídrica (-0,03 MPa). Já, para o haloxyfop-metil, tal comportamento não foi verificado, pois o controle foi melhor quando não ocorreu restrição hídrica,

sendo reduzido à medida que se incrementou o estresse hídrico sobre as plantas de capim-pé-de-galinha.

Assim, a eficiência de controle de um herbicida pulverizado em pós-emergência sobre uma comunidade infestante, sob condição de estresse hídrico, irá depender principalmente de fatores como: molécula de herbicida utilizada, espécie e estádio de desenvolvimento da planta daninha-alvo e o nível de estresse hídrico imposto ao solo.

REFERÊNCIAS

ABBOTT, L.B. & STERLING, T.M. Recovery of African rue seedlings from water stress: Implications for recruitment and invasion. In: 7TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE ECOLOGY AND MANAGEMENT OF ALIEN PLANT INVASION, 2003, Fort Lauderdale, **Proceedings**... 2003. p. 3.

ADKINS, S. W. et al. Influence of environmental factors on glyphosate efficacy when applied to *Avena fatua* or *Urochloa panicoides*. **Weed Research**, v. 38, n. 2, p. 129-138. 1998.

AHMADI, M.; HADERLIE, L.; WICKS, G. Effect of growth stage and water stress on barnyard grass (*Echinochloa crus-galli*) control and on glyphosate absorption and translocation. **Weed Science**, v. 28, n. 3, p. 277-282, 1980.

AHMAD, P.; JALEEL, C. A.; SHARMA, S. Antioxidant defense system, lipid peroxidation, proline-metabolizing enzymes, and biochemical activities in two *Morus alba* genotypes subjected to NaCl stress. **Russian Journal of Plant Physiology**, v. 57, n. 4, p. 509-517, 2010.

AFZAL, A. et al. Water deficit-induced regulation of growth, gas exchange, chlorophyll fluorescence, inorganic nutrient accumulation and antioxidative defense mechanism in mungbean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek]. **Journal of Applied Botany and Food Quality**, v. 87, n. 1 p. 147-156, 2014.

ALI, M.L. et al. Greenhouse screening of maize genotypes for deep root mass and related root traits and their association with grain yield under water-deficit conditions in the field. **Euphytica**, v. 207, n. 1, p. 79-94, 2016.

ASHRAF, M. Inducing drought tolerance in plants: recent advances. **Biotechnology Advances**, v. 28, n. 1, p. 169-183, 2010.

ASHRAF, M., HARRIS, P. J. C. Photosynthesis under stressful environments: an overview. **Photosynthetica**, v. 51, n. 2, p. 163-190, 2013.

BALARDIN, R. S. et al. Tratamento de sementes com fungicidas e inseticidas como redutores dos efeitos do estresse hídrico em plantas de soja. **Ciência Rural**, v. 41, n. 7, p. 1.120-1.126, 2011.

BAÑON, S. et al. Effects of water stress and night temperature preconditioning on water relations and morphological and anatomical changes of *Lotus creticus* plants. **Scientia Horticulturae**, v. 101, n. 3, p. 333-342, 2004.

BARLOW, E. W. R. Water relations of the mature leaf. In: DALE, J. E.; MILTHORPE, F. L., eds. **The growth and functioning of leaves**. Cambridge: University Press, 1983. p.315-345.

BENEKOS, K. et al. Overexpression of a specific soybean GmGSTU4 isoenzyme improves diphenyl ether and chloroacetanilide herbicide tolerance of transgenic tobacco plants. **Journal of biotechnology**, v. 150, n. 1, p. 195-201, 2010.

BENINCASA, M. M. P. et al. Método não destrutivo para estimativa da área foliar de *Phaseolus vulgaris* L. (feijoeiro). **Científica**, v. 4, p. 43-8, 1976.

BOYDSTON, R.A. Drought stress reduces fluazifop-p activity on green foxtail (*Setaria viridis*). **Weed Science**, v.40, p.20–24, 1992.

BRAY, E. A. Molecular and physiological responses to water-deficit stress Advances.

In: JENKS, M. A.; HASEGAWA, P. M.; JAIN, S. M. (Eds). **Molecular breeding toward drought and salt tolerant crops**. Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2007, p. 121-140.

BUKOVAC, M.J. et al. Sorption of organic compounds by plant cuticles. **Weed Science**, v. 38, n. 3, p. 289-298, 1990.

CABUSLAY, G. S.; ITO, O.; ALEJAR, A. A. Physiological evaluation of responses of rice (*Oryza sativa* L.) to water deficit. **Plant Science**, v. 163, n. 4, p. 815-827, 2002.

CHACHALIS, D.; REDDY, K.; ELMORE, C.D. Characterization of leaf surface, wax composition, and control of red vine and trumpet creeper with glyphosate. **Weed Science**, v. 49, n. 2, p. 156–163, 2001.

CHASE, R. L.; APPLEBY, A. P. Effects of humidity and moisture stress on glyphosate control of *Cyperus rotundus* L. **Weed Research**, v. 19, n. 4, p. 241-246, 1979.

CHAVES, M. M. Effects of water deficits on carbon assimilation. J**ournal of Experimental Botanical,** v. 42, n. 1, p. 1-16, 1991.

CUMMINS, I. et al. Multiple roles for plant glutathione transferases in xenobiotic detoxification. **Drug metabolism reviews**, v. 43, n. 2, p. 266-280, 2011.

DANIELE, P.G.; DE STEFANO, C.; PRENESTI, E.; SAMMARTANO, S. Copper (II) complexes of N-(phosphonomethyl) glycine in aqueous solution: a thermodynamic and spectrophotometric study. **Talanta**, v. 45, n. 2, p. 425-431, 1997.

DEMIRTAS, Ç. et al. Quality and yield response of soybean (*Glycine max* L. Merrill) to drought stress in sub-humid environment. **African Journal of Biotechnology,** v. 9, n. 41, p. 6.873-6.881, 2010.

DEMIDCHIK, V. Mechanisms of oxidative stress in plants: from classical chemistry to cell biology. **Environmental and Experimental Botany**, v. 109, p. 212-228, 2015.

DESCLAUX, D.; ROUMET, P. Impact of drought stress on the phenology of two soybean (*Glycine max* L. Merr) cultivars. **Field Crops Research**, v. 46, n.1, p. 61-70, 1996.

DEVINE, M. D. Mechanisms of herbicide absorption and translocation in plants. **Weed Science**, v. 38, p. 279-285, 1990.

DILL, G. M. Glyphosate-resistant crops: history, status and future. **Pest Management Science**, v. 61, n. 3, p. 219-224, 2005.

DIXON, D. P.; SKIPSEY, M.; EDWARDS, R. Roles for glutathione transferases in plant secondary metabolism. **Phytochemistry,** v. 71, n. 4, p. 338-350, 2010.

DOGAN, E.; KIRNAK, H.; COPUR, O. Deficit irrigations during soybean reproductive stages and CROPGRO-soybean simulations under semi-arid climatic conditions. **Field Crops Research**, v. 103, n. 2, p. 154-159, 2007.

DURIGAN, J. C. E**feito de adjuvantes na aplicação e eficácia dos herbicidas**. Jaboticabal: FUNEP, 1993.

FENTA, B. A. et al. Field phenotyping of soybean roots for drought stress tolerance. **Agronomy**, v. 4, n. 3, p. 418-435, 2014.

FERREIRA, E. A. et al. Estudos anatômicos de folhas de espécies de plantas daninhas: II - *Bidens pilosa*, *Emilia sonchifolia*, *Ageratum conyzoides e Sonchus asper*. **Planta Daninha,** v. 20, n. 3, p. 327-335, 2002.

FLEXAS, J. et al. Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants. **Plant Biology**, v. 6, n. 3, p. 269-279, 2004.

GARG, N.; MANCHANDA, G. ROS generation in plants: boon or bane? **Plant Biosystems**, v. 143, n. 1, p. 81–96, 2009.

GALMÉS, J. et al. Leaf responses to drought stress in Mediterranean accessions of *Solanum lycopersicum*: anatomical adaptations in relation to gas exchange parameters. **Plant, Cell & Environment**, v. 36, n. 5, p. 920-935, 2013.

GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant physiology and biochemistry**, v. 48, n. 12, p. 909-930, 2010.

GILL, S. S. et al. Superoxide dismutase—mentor of abiotic stress tolerance in crop plants. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 14, p. 10375-10394, 2015.

GONÇALVES, C.G. **Modificações morfológicas, fisiológicas e seletividade da soja a diferentes herbicidas em resposta ao estresse hídrico**. 2017. 132 f. Tese (Doutorado). Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal - SP, 2017.

GONÇALVES, C. G. et al. Morphological modifications in soybean in response to soil water management. **Plant Growth Regulation**, v. 83, n. 1, p. 105-117, 2017.

GONÇALVES, C. G. et al. Action of imazethapyr and lactofen on the nodulation of conventional and transgenic soybean under drought stress conditions. **Planta Daninha**, v. 36, 2018.

GUERFEL, M. et al. Impacts of water stress on gas exchange, water relations, chlorophyll content and leaf structure in the two main Tunisian olive (*Olea europaea* L.) cultivars. **Scientia Horticulturae**, v. 119, n. 3, p. 257-263, 2009.

HADLEY, J.; SMITH, W. Influence of leaf surface wax and leaf area to water content ratio on cuticular transpiration in western conifers, USA. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 20, p. 1.306–1.311, 1990.

HARFOUCHE, A.; MEILAN, R.; ALTMAN, A. Molecular and physiological responses to abiotic stress in forest trees and their relevance to tree improvement. **Tree Phy-**

siology, v. 34, n. 11, p. 1.181-1.198, 2014.

HARRINGTON, T.B.; MILLER, J.H. Effects of application rate, timing, and formulation of glyphosate and triclopyr on control of chinese privet (*Ligustrum sinense*). **Weed Technology**, v. 19, n. 1, p. 47-54, 2005.

HINZ, J. R.; OWEN, M. D. K. Effect of drought stress on velvetleaf (*Abutilon theophrasti*) and bentazon efficacy. **Weed Science**, v. 42, n. 1, p. 76-81, 1994.

JARVIS, P. G.; MCNAUGHTON, K. G. Stomatal control of transpirations: scaling up from leaf to region. **Advances Ecological Research**, v. 15, p. 1-49, 1986.

KELLS, J. J.; MEGGIT, W. F.; PENNER, D. Absorption, translocation, and activity of fluazifop-p-butyl as influenced by plant growth stage and environment. **Weed Science**, v. 32, p. 143–149. 1984.

KICHEVA, M. I.; TSONEV, T. D.; POPOVA, L. P. Stomatal and nonstomatal limitations to photosynthesis in the wheat cultivars subjected to water stress. **Photosynthetica**, v. 52, n. 1, p. 107-16, 1994.

KNOCHE, M. Organosilicone surfactant performance in agricultural spray application: a review. **Weed Research**., v. 34, p. 221-239, 1994.

LARCHER, W. Plantas sob estresse. In: **Ecofisiologia Vegetal.** São Carlos: Editora RIMA, 2000. p. 341-430.

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal.** São Carlos: RIMA, 2006.

LEVENE, B. C.; OWEN, M. D. K. Effect of moisture stress and leaf age on bentazon absorption in common cocklebur (*Xanthium strumarium*) and velvetleaf (*Abutilon theophrasti*). **Weed Science,** v. 43, p. 7-12, 1995.

LIMA, W. P. **Impacto ambiental do eucalipto**. 2.ed. São Paulo: Editora da Universi-

dade de São Paulo, 1993.

LIMA, W.P. Impactos da cultura do eucalipto. **Revista Silvicultura**, n.64, p.32-38, 1995.

LUDLOW, M. M. Adaptative significance of stomatal responses to water stress. In: TURNER, N. C.; KRAMER, P. J., (Eds). **Adaptation of plants to water and high temperature stress**. New York, John-Wiley, 1980. p. 123-138.

MASOJIDEK, J.; TRIVEDI, S.; HALSHAW, L. The synergistic effect of drought and light stresses in sorghum and pearl millet. **Plant Physiology**, v. 96, p. 198-207, 1991.

MADANI, A.; NEHAL, M.; HAQUE, S.S.; KHAN, A. Perspective of oxidative stress in a biological system and prevention by naturally occurring antioxidant. **Biological Sciences**, v. 80, n. 4, p. 287-295, 2010.

MAK, M. et al. Leaf mesophyll K^+, H^+ and $Ca2^+$ fluxes are involved in drought-induced decrease in photosynthesis and stomatal closure in soybean. **Environmental and Experimental Botany**, v. 98, n. 1, p. 1-12, 2014.

MAKBUL, S. et al. Changes in anatomical and physiological parameters of soybean under drought stress. **Turkish Journal of Botany**, v. 35, n. 4, p. 369-377, 2011.

MANAVALAN, L.P. et al. Physiological and molecular approaches to improve drought resistance in soybean. **Plant and Cell Physiology**, v. 50, n. 7, p. 260-276, 2009.

MCALLISTER R. S.; HADERLIE L. C. Seasonal variations in Canada-thistle (*Cirsium arvense*) root bud growth and root carbohydrate reserves. **Weed Science**, v. 33, n. 1, p. 44-49, 1985.

MECKEL, L. et al. Effect of moisture stress on seed growth in soybeans. **Agronomy Journal**, v. 76, n. 4, p. 647-650, 1984.

MONQUEIRO, P. A. et al. Absorção, translocação e metabolismo do glyphosate por plantas tolerantes e suscetíveis a este herbicida. **Planta Daninha**, v. 22, n. 3, p. 445-451, 2004.

MILLAR, A. A. GARDNER, W. R. Effect of the soil and plant water potentials on the dry matter production of snap beans. **Agronomy Journal**, v. 64, p. 559-562, 1972.

MORRISON, R. G.; LOWNDS, N. K.; STERLING, T. M. Picloram uptake, translocation, and efficacy in relation to water status of Russian Knapweed (Acroptilon repens). **Weed Science**, v. 43, n. 1, p. 34-39, 1995.

MUNNÉ-BOSCH, S.; ALEGRE, L. Die and let live: leaf senescence contributes to plant survival under drought stress. **Functional Plant Biology**, v. 31, p. 203–216, 2004.

NGUYEN, A.; LAMANT, A. Variation in growth and osmotic regulation of roots of water-stressed maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) provenances. **Tree Physiology**, v. 5, n. 1, p. 123–133, 1989.

NOBEL, P. S. **Introduction to biophysical plant physiology**. San Francisco: W.H. Freeman, 1974.

OHASHI, Y.; NAKAYAMA, N.; SANEOKA, H.; FUJITA, K. Effects of drought stress on photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and stem diameter of soybean plants. **Biologia Plantarum**, v.50, n.1, p. 38-141, 2006.

OLIVEIRA JR., R. S.; BACARIN, M. A. Absorção e translocação de herbicidas. In: OLIVEIRA JR., R. S.; CONSTANTIN, J. (Coords. Eds.). **Plantas daninhas e seu manejo**. Guaíba: Agropecuária, 2001. p. 261-290.

PAIVA, A. S.; FERNANDES, E. J.; RODRIGUES, T. J.; TURCO, J. E. Condutância estomática em folhas de feijoeiro submetido a diferentes regimes de irrigação. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 1, p. 161-169, 2005.

PATTERSON, D. T. Effects of environmental stress on weed/crop interactions. **Weed Science**, v. 43, n. 3, p. 483-490, 1995.

PEREGOY, R.S. et al. Moisture stress effects on the absorption, translocation, and metabolism of haloxyfop in johnsongrass (*Sorghum halepense*) and large crabgrass (*Digitaria sanguinalis*). **Weed Science**, v. 38, n. 4/5, p. 331-337, 1990.

PEREIRA, M. R. R. et al, J. Effect of water stress on herbicide efficiency applied to *Urochloa decumbens*. **Ciencia e Investigação Agraria**, v. 39, n. 1, p. 221-20, 2012a.

PEREIRA, M. R. R. et al. Efficacy of herbicides applied to Digitaria horizontalis plants under diferente water conditions. **Planta Daninha**, v. 30, n. 1, p. 165-172, 2012b.

PEREIRA, M. R. R. et al. Influence of soil water potential in the action of herbicides on goosegrass (*Eleusine indica* (L.) Gaertn). **Bioscience Jounal**, v. 31, n. 1, p. 107-117, 2015a.

PEREIRA, M. R. R. et al. Herbicidas inibidores da accase em plantas de *Cenchrus echinatus* em estresse hídrico. **Bioscience Jounal**, v. 31, n. 1, p. 96-106, 2015b.

PEREIRA, M.R.R. et al. Efficacy of herbicides applied to *Digitaria horizontalis* plants under diferente water conditions. **Planta Daninha**, v. 35, e 017162268, 2017.

POLIZEL, A. M. et al. Molecular, anatomical and physiological properties of a genetically modified soybean line transformed with rd29A: AtDREB1A for the improvement of drought tolerance. **Genetics and Molecular Research,** v. 10, n. 4, p. 3.641-3.656, 2011.

PROCÓPIO, S.O. et al. Estudos anatômicos de folhas de espécies de plantas daninhas de grande ocorrência no Brasil. V - *Leonurus sibiricus*, *Leonotis nepetaefolia*, *Plantago tomentosa e Sida glaziovii*. **Planta Daninha**, v. 21, n. 3, p. 403-411, 2003.

QUICK, W. P.; CHAVES, M. M.; WENDLER, R. The effect of water stress on pho-

tosynthetic carbon metabolism in four species grown under field conditions. **Plant Cell and Environment**, v. 15, p. 25-35, 1992.

RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. S. **Guia de herbicidas**. Londrina: IAPAR, 2018.

RUITER, H.; MAINEN, E. Influence of water stress and surfactant on the efficacy, absorption, and translocation of glyphosate. **Weed Science**, v. 46, n. 3, p. 289-296, 1998.

SADEGHIPOUR, O.; ABBASI, S. Soybean response to drought and seed inoculation. **World Appl. Sci.** J, v. 17, p. 55-60, 2012.

SHANI, H. N. Effect of soil moisture stress on the absorption, translocation, and herbicidal efficiency of foliage-applied herbicides. **International Pest Control**, v. 17, p. 13-17, 1975.

SILVA JUNIOR, A. C. **Efeito do glyphosate em plantas daninhas da família Poaceae submetidas a diferentes potenciais hídricos do solo**. 2018. 95 f. Tese (Doutorado em Agronomia - Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2018.

SILVA, C. D. S. et al. Curso diário das trocas gasosas em plantas de feijão-caupi submetidas a deficiência hídrica. **Revista Caatinga**, v. 23, n. 4, p. 7-13, 2010.

SILVA, A. R. A. et al. Trocas gasosas em plantas de girassol submetidas à deficiência hídrica em diferentes estádios fenológicos. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 1, p. 86-93, 2013.

SILVA, P.A. et al. Leaf gas exchange and multiple enzymatic and non-enzymatic antioxidant strategies related to drought tolerance in two oil palm hybrids. **Trees**, v. 30, n. 1, p. 203-214, 2016.

SCHONHERR, J.; BUCKOVAC, M. J. Penetration of stomata by liquids. **Plant Physio-**

logy, v. 49, p. 813-819, 1972.

SCHULZE, E.D. et al. Stomatal responses to air humidity and to soil drought. In: ZEIGER, E.; FARQUHAR, G.; COWAN, I. (Eds.). **Stomatal function**. Stanford: Stanford University Press, 1987. p.311-321.

SHAO, H.B. et al. Higher plant antioxidants and redox signaling under environmental stresses. **Computes Rendus Biologies**, v. 331, n. 6, p. 433-441, 2008.

SHARMA, P. et al. Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. **Journal of Botany**, v. 2012, n. 1, p. 1-26, 2012.

SKIPSEY, M. et al. Manipulation of plant tolerance to herbicides through co-ordinated metabolic engineering of a detoxifying glutathione transferase and thiol cosubstrate. **Plant biotechnology journal**, v. 3, n. 4, p. 409-420, 2005.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013.

TENHUNEN, J. D.; PEARCY, R. W.; LARANCE, O. L. Diurnal variation in leaf conductance and gas exchange in natural environments. In: ZEIGER, E.; FARQUHAR, G.; COWAN, I. (Eds.). **Stomatal function**. Stanford: Stanford University Press, 1987. p.323-351.

TRIPATHI, P. et al. A toolbox of genes, proteins, metabolites and promoters for improving drought tolerance in soybean includes the metabolite coumestrol and stomatal development genes. **BMC Genomics**, v. 17, n. 1, p. 1-22, 2016.

TURNER, N. C. Further progress in crop water relations. **Advances in Agronomy**, v. 58, n. 1, p. 293-338, 1997.

TÜRKAN, I. et al. Differential responses of lipid peroxidation and antioxidants in the leaves of drought-tolerant *P. acutifolius* Gray and drought-sensitive *P. vulgaris* L.

subjected to polyethylene glycol mediated water stress. **Plant Science**, v. 168, n. 1, p. 223-231, 2005.

VADEZ, V. Root hydraulics: the forgotten side of roots in drought adaptation. **Field Crops Research**, v. 165, p. 15-24, 2014.

VITORINO, H. S.; MARTINS, D. Efeito do déficit hídrico na eficiência de herbicidas e nas características bioquímicas de *Ipomoea grandifolia*. **Planta Daninha**, v. 30, n. 1, p. 185-191, 2012.

VITORINO, H. S. et al. Efeito do déficit hídrico na eficiência de herbicidas e nas características bioquímicas de picão-preto. **Bioscience Jounal**, v. 28, n. 5, p. 692-698, 2012.

VITORINO, H.S. et al. Déficit hídrico na eficiência de herbicidas e nas características bioquímicas de *Euphorbia heterophylla*. **Semina-Ciências Agrárias**, v. 34, n. 1, p. 19-28, 2013.

CAPÍTULO 16

MANEJO DE ORGANISMOS GENETICAMENTE MOFIFICADOS TOLERANTES A HERBICIDAS

Leandro Paiola Albrecht[1]
Alfredo Júnior Paiola Albrecht[1]
André Felipe Moreira Silva[2]
Arthur Arrobas Martins Barroso[1]

[1]Doutor em Agronomia, Professor da Universidade Federal do Paraná (UFPR); [2]Doutor em Agronomia, Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (USP - ESALQ)

1 INTRODUÇÃO

Organismos geneticamente modificados não são novidade e não deixarão de ter uma presença marcante na humanidade tão cedo. Apesar das polêmicas e dos questionamentos sobre os transgênicos, os mesmos vêm consolidando-se há várias décadas e provando-se cada vez mais úteis e seguros.

Com o objetivo de caracterizar essa biotecnologia, será usado um conceito simples e direto prescrito pelo Conselho de Informações sobre Biotecnologia (CIB, 2019a): "Transgênicos são organismos geneticamente modificados (OGM) que recebem gene de outro ser vivo em seu DNA por meio de técnicas da biotecnologia". Um dos primeiros casos de sucesso da transgenia não foi com plantas, e reporta a 1978, com a produção de insulina humana por microrganismos, nos Estados Unidos da América (EUA). No Brasil, temos como relato oficial a soja RR (Roundup Ready™) em 1998, mas devido a problemas, foi liberado comercialmente apenas na safra de 2003/2004. No entanto, hoje, mais de 92% da área cultivada é com soja RR (CIB, 2019a).

Antes de prosseguir, é importante caracterizar dois conceitos que serão usados: 'evento' e 'tecnologia' ou 'produto' transgênico, e para isso citar-se-á mais uma vez o CIB (2019a): "Para obter uma planta transgênica com determinada característica de interesse, é preciso produzir centenas ou milhares de exemplares. Cada um deles é um 'evento de transformação genética' e vem de uma única célula vegetal, na qual houve inserção do gene desejado. A partir do evento selecionado, é feita a multiplicação, de forma a gerar descendentes". Enquanto tecnologia ou produto transgênico é o resultado de um ou mais genes ("*gene stacking*", pois podem ser piramidados, ou seja, a combinação de dois ou mais transgenes) inseridos em uma planta (por exemplo), e que geram características desejáveis e aplicáveis, e que, portanto, alcançam o público usuário ou consumidor.

A partir do conceito de tecnologia ou produto transgênico, é importante salientar que não existem só plantas transgênicas no Brasil aprovadas pela Comissão Técnica Nacional de Biossegurança – CTNBio. Esse fato pode ser comprovado por dados sintetizados pelo CIB (2019b), que até o fim de 2019 foram 176 produtos transgênicos aprovados, dos quais 60,8% são plantas, e os outros 39,2% são vacinas, microrganismos, insetos e medicamentos.

Para as culturas, há predominância do milho, algodão e soja, mas também existem feijão, eucalipto e cana-de-açúcar. Os quais perfazem 111 produtos, em número atualizado para 2020, dos quais 89 conferem tolerância a herbicidas (Tabela 1). E as tecnologias de tolerância a herbicidas, além do objetivo primordial, que é facilitar o manejo de plantas daninhas, podem proporcionar também: economia no uso de defensivos (pelo aumento na eficiência de controle das plantas daninhas); menor uso de água (diminui o número de aplicações/pulverizações); maior comodidade nas práticas agrícola (pela facilidade no manejo); segurança alimentar; aumento da produtividade (pois permite produzir mais, com menor matointerferência); e preservação do meio ambiente (pois usam-se menos agroquímicos e, havendo aumento na produção por unidade de área, diminui a necessidade de abertura de novas áreas).

Tabela 1. Produtos transgênicos aprovados no Brasil.*

Cultura	Total	TH	Aprovação**
Milho	64	54	2007
Algodão	23	18	2005
Soja	19	17	1998
Cana-de-açúcar	3	-	2017
Feijão	1	-	2011
Eucalipto	1	-	2015
Total	111	89	

TH: tolerância a herbicidas.

*Atualizado em 23-07-2020. **Ano de aprovação do primeiro evento.

Fonte: ISAAA (2020).

A princípio, neste material que segue, será assumido para plantas o termo 'tolerante' a herbicidas e não transgênicos 'resistentes' a herbicidas. Não se adentrará aos detalhes dessa 'polêmica', apenas assumir-se-á uma posição, que se justifica no entendimento de que os eventos transgênicos têm comportamento variável. Essa variação, em resposta ao herbicida, está em dependência da expressão do gene inserido na planta, condições meteorológicas, estresses fisiológicos associados, formulação do herbicida, dose do herbicida, entre outros. No decorrer deste texto, observar-se-á a confirmação desta tese, apesar de não ser o objetivo dessa exposi-

ção. O foco deste capítulo é apresentar e caracterizar as possibilidades de eventos e tecnologias transgênicas, associada à tolerância de herbicidas e úteis no manejo integrado de plantas daninhas (MIPD).

2 TRANSGÊNICOS TOLERANTES A HERBICIDAS: DESAFIOS E OPORTUNIDADES

No contexto do MIPD, os produtos transgênicos são uma excelente ferramenta. As plantas daninhas são altamente agressivas e competem pela luz, água, nutrientes, espaços, levando a perdas que podem ser superiores a 80%. Em alguns casos, podem até inviabilizar a colheita (SILVA, 2011). Dependendo da espécie, densidade e distribuição destas plantas na área, podem ocorrer perdas significativas na lavoura, reduzindo o potencial da cultura implantada (BARBOSA et al., 2014). O controle químico, com o uso de herbicidas, é o método mais utilizado para o controle das plantas daninhas. Dentre os métodos de controle, está o uso de herbicidas residuais, utilizados na dessecação e em pós-emergência da cultura (ALBRECHT et al., 2017a; ALBRECHT et al., 2018a; ALBRECHT et al., 2018b).

Esse domínio das lavouras por plantas daninhas leva a prejuízos para o agronegócio brasileiro, que para o caso da buva pode-se chegar a valores exorbitantes só no controle. Chega-se aos seguintes números para a buva, em que o controle que seria de R$ 95,40 por hectare, passa para R$ 126,20 (isso para a buva resistente apenas ao glyphosate). O pior cenário em relação ao aumento dos custos é a presença de buva juntamente com capim-amargoso, em infestação mista, situação estimada em 2,7 milhões de ha, em que os custos aumentam entre R$ 793.260.000,00 a R$ 1.294.650.000,00, com incremento médio de R$ 1.041.255.000,00 por ano. O mesmo estudo ainda aponta valores assustadores para o controle na cultura da soja, que pode chegar por hectare, para o produtor, a R$ 204,80 para controle de capim-amargoso e R$ 479,50, se tiver capim-amargoso mais buva (ADEGAS et al., 2017).

Mas, paralelamente aos benefícios, os herbicidas podem apresentar desvantagens e, entre estas, há a possibilidade de ocorrer fitotoxidade ou fitointoxicação à cultura (BIAZOTO, 2017). Com frequência, verifica-se que aplicações indevi-

das resultam em danos que, algumas vezes, comprometem a produção, o que, em geral, é consequência da escolha incorreta do produto, dose, sobreposição da regulagem do equipamento, aplicação e deriva de produto aplicado em lavoura vizinha. Outro aspecto a considerar é a ação fitotóxica do herbicida, devido à sensibilidade apresentada pelas cultivares. Muitos problemas podem ser evitados, desde que se conheçam as especificações e as características do produto com o qual se está trabalhando (GAZZIERO; NEUMAIER, 1985). Nesse sentido, os transgênicos tolerantes a herbicida possuem seletividade relativa ao herbicida ao qual foram melhorados, podendo os mesmos, mal manejados, levar danos à própria cultura tolerante ou à cultura vizinha não transgênica.

Outro desafio atual da agricultura está na seleção de biótipos resistentes de plantas daninhas, o que é assustador, como pode ser observado em fontes confiáveis e internacionais (HEAP, 2020). Ao mesmo tempo em que a resistência de plantas daninhas a herbicidas é um enorme desafio à agricultura, torna-se uma oportunidade para o emprego e a rotação de eventos e tecnologias transgênicas disponíveis na agricultura.

A intitulada "geração RR", de profissionais que se habituaram a somente utilizar glyphosate no controle químico, mostrou seus resultados mais dramáticos ao impor a seleção de biótipos resistentes ao glyphosate. O uso repetido de qualquer agente químico pode ocasionar esse efeito de seleção, o mesmo vale para herbicidas, como pode ser atestado em divulgações internacionais de relato de resistência (HEAP, 2020). No Brasil, destacam-se aos olhos da assistência técnica e da pesquisa, casos de resistência da buva (*Conyza sp.*), capim-amargoso (*Digitaria insularis*), capim-pé-de-galinha (*Eleusine indica*), entre tantos outros.

Importante destacar que eventos transgênicos, que conferem tolerância a herbicidas, não são os responsáveis pela seleção de biótipos de plantas daninhas resistentes a herbicidas. O que leva a essa situação é a simplificação de manejo com a adoção dos mesmos eventos e herbicidas. A simplificação de manejo de plantas daninhas é mostrada por Duke (2018); nos Estados Unidos, o uso de outros herbicidas despencou em culturas tolerantes a glyphosate; como exemplo, tem-se o herbicida acifluorfen, que teve o uso muito reduzido após a introdução da soja tolerante a glyphosate em 1996.

Esta situação não é diferente aqui no Brasil e ajuda a explicar os crescentes

casos de plantas daninhas com populações resistentes a herbicidas. Como exemplo, cita-se que, nos últimos anos, relatos de buva resistente a herbicidas aumentaram no Brasil, sendo que as três espécies registradas como resistentes são: *Conyza bonariensis*, *C. canadensis e C. sumatrensis* resistentes ao glyphosate; sendo a *C. sumatrensis* com resistência múltipla para glyphosate e chlorimuron (HEAP, 2020). E estudos realizados na UFPR - Setor Palotina, pelo Supra Pesquisa, demonstram que, na região oeste do Estado do Paraná, existem biótipos de *C. sumatrensis* com resistência múltipla aos herbicidas: paraquat, glyphosate e chlorimuron (HEAP, 2020). O mesmo cenário se observa em um País vizinho, o Paraguai, em estudos recentes desenvolvidos pelo Supra Pesquisa, com parcerias locais. Ou seja, o glyphosate deixou de fazer seu papel, usaram-se outros herbicidas em excesso, aumentou-se a pressão de seleção novamente, levando ao aparecimento de populações com resistência múltipla.

Destaca-se, assim, a necessidade do MIPD, e dentro dele a rotação de mecanismos de ação de herbicidas, e para que isso se efetive, a rotação de eventos transgênicos é importante. Pois, rotacionando os eventos transgênicos que estão e que estarão disponíveis no mercado, propicia-se a oportunidade de utilização no MIPD de maior diversidade de mecanismos de ação, proporcionando a rotação deles e diminuindo a pressão de seleção. Isso gera soluções aos principais desafios no controle de plantas daninhas no cenário nacional. A seguir serão, apresentados e discutidos as tecnologias e os cultivos tolerantes a herbicidas que podem integrar o MIPD.

3 CULTURAS TOLERANTES A GLYPHOSATE

No Brasil, têm-se eventos transgênicos que conferem tolerância a glyphosate para as culturas da soja, milho e algodão. Tolerância é conferida pelos genes *cp4epsps*, *2mepsps e mepsps* (Tabela 2).

O glyphosate é um herbicida pós-emergente, sistêmico e não seletivo, e o controle que este proporciona decorre da inibição da enzima 5-enolpiruvil-shiquimato-3-fosfato sintetase (EPSPs), o que impede a biossíntese dos aminoácidos aromáticos (tirosina, fenilalanina e triptofano) precursores de produtos como lignina,

alcaloides, flavonoides e ácidos benzoicos (ABREU et al., 2008; CAETANO, 2009; CAVALIERI et al., 2012; ALBRECHT et al., 2013). Mesmo em culturas transgênicas tolerantes, sintomas indesejáveis podem ser observados decorrentes da aplicação de glyphosate. Um resumo destes efeitos é apresentado a seguir (Tabela 3).

Tabela 2. Produtos transgênicos aprovados no Brasil, com tolerância a glyphosate.

	Evento	Tecnologia**	Gene	Espécie doadora	Aprovação
Soja	GTS 40-3-2	Roundup Ready™ (RR)	*cp4epsps*	*Agrobacterium tumefaciens*	1998
	MON87701 x MON89788	Intacta™ Roundup Ready™ 2 Pro (RR2)	*cp4epsps*	*A. tumefaciens*	2010
	FG72	-	*2mepsps*	*Z. mays*	2015
	DAS44406-6	Enlist E3™	*2mepsps*	*Z. mays*	2015
	MON87708	Roundup Ready™ 2 Xtend™	*cp4epsps*	*A. tumefaciens*	2016
Milho*	GA21	Roundup Ready™ ou Agrisure™ GT	*mepsps*	*Z. mays*	2008
	NK603	Roundup Ready™ 2	*cp4epsps*	*A. tumefaciens*	2008
	MON88017	YieldGard™ VT™	*cp4epsps*	*A. tumefaciens*	2010
	MON87427	Roundup Ready™	*cp4epsps*	*A. tumefaciens*	2016
Algodão	MON1445	Roundup Ready™	*cp4epsps*	*A. tumefaciens*	2008
	GHB614	GlyTol™	*2mepsps*	*Z. mays*	2010
	MON88913	Roundup Ready™ Flex™	*cp4epsps*	*A. tumefaciens*	2011

* Para milho, nesta obra, adotou-se o termo RR para eventos com gene mepsps e RR2 para eventos com gene *cp4epsps*.

** Tolerância para estas e outras tecnologias/combinações com estes eventos.

Fonte: ISAAA (2020).

Tabela 3. Exemplos de efeitos indesejáveis em culturas transgênicas tolerantes, decorrentes da aplicação de glyphosate.

	Efeito	Tecnol.	Dose*	Estádio	Referência
Soja	Redução em produtividade	RR	≥1.440	V6 ou R2	Albrecht et al. (2011)
		RR	≥900	V3	Merotto Junior. et al. (2015)
		RR2	≥1.440	V4	Cesco et al. (2018)
	Redução na fixação biológica de N_2	RR	1.200	V4-V5	Zobiole et al. (2010a)
	Redução na eficiência do uso da água	RR	>1.200	V4 ou V7	Zobiole et al. (2010b)

	Efeito	Tecnol.	Dose*	Estádio	Referência
Soja	Reduções nos teores nutricionais das folhas	RR	1.200	V4	Zobiole et al. (2010c)
	Reduções nos teores de óleo dos grãos	RR2	≥2.880	V4	Moreno et al. (2018)
	Redução na qualidade de sementes	RR	≥720	V4-V5	Albrecht et al. (2014b)
		RR	≥1.440	V6 ou R2	Albrecht et al. (2012a)
Milho	Redução em produtividade	RR2	1.200	V5-V6	Correia e Santos (2013)
	Reduções nos teores nutricionais das folhas	RR2	1.440 + 1.440	V3 + V8	Osório et al. (2015)
	Redução no acúmulo de biomassa	RR2	1.080	V3-V4	Carvalho et al. (2015)
Algodão	Abortamento de botões florais	RR	1.000	V4, V5 ou V6	Jones e Snipes (1999)
		RR	1.120	V4 ou V8	Pline-Srnic et al. (2004)
	Redução na qualidade da fibra	RR	1.120	V7	Pline-Srnic et al. (2004)
	Redução na viabilidade de pólen	RR	1.120	V4	Pline et al. (2002)

*Doses em g ea ha^{-1}.

Diferentes genótipos de soja podem apresentar respostas diferentes quando submetidos a doses de glyphosate. Além do genótipo, outros fatores, como dose, estágio fenológico de desenvolvimento (na aplicação) e grupos de maturação das cultivares, podem inferir sobre efeitos ocasionados pelo herbicida. Esse comportamento relativo das cultivares diante das formulações de glyphosate concorda com a literatura pertinente (ALBRECHT et al., 2012a; ALBRECHT et al., 2014a) e pode ser explicado pelos efeitos secundários negativos do glyphosate (ZOBIOLE et al., 2010a, b, c; KRENCHINSKi et al., 2017).

O glyphosate, assim como outros herbicidas, depende de constituintes presentes na calda de pulverização, que podem melhorar sua ação (CUNHA et al., 2009). De acordo com Reis et al. (2014), as peculiaridades de cada formulação (diferentes adjuvantes ou sais) influenciam diretamente a velocidade de absorção, translocação e consequente ação do herbicida, eficiência no controle de plantas daninhas (JAKELAITS et al., 2001), intoxicação a organismos não alvo, incluindo a microbiota do solo (SANTOS et al., 2007) e desbalanço no estado nutricional das plantas (CAVALIERI et al., 2012). Existem diversas formulações de glyphosate; entretanto, to-

das possuem o mesmo mecanismo de ação, independentemente dos sais utilizados (REIS et al., 2010). Os sais registrados, hoje, são o de isopropilamina, dimetilamina, sal de amônio, sal de diamônio, sal potássico e a mistura entre eles.

Portanto, sabe-se que diferentes formulações do herbicida glyphosate são utilizadas para o controle de plantas daninhas em meio à lavoura, e o efeito dessas formulações varia sobre o desempenho da cultura e a qualidade das sementes colhidas, em diferentes cultivares de soja. O que se sabe, efetivamente, é do potencial de injúria do glyphosate sobre a soja RR/RR2, que pode ser potencializada pelo adjuvante contido na formulação (ALBRECHT et al., 2018e).

Em síntese entende-se que doses superiores a 1.440 g e a ha^{-1}, potencialmente, causam danos à soja RR/RR2. Além dos efeitos sumarizados na Tabela 3, sintoma comum em soja é o *yellow flashing*, que se trata do amarelecimento das folhas superiores, podendo ser definido como sintoma visual do efeito negativo do glyphosate sobre parâmetros fotossintéticos e teores de clorofila (ZOBIOLE et al., 2011).

O *yellow flashing* pode ser observado sobretudo para aplicações a partir do estádio V5, e em doses acima de 2.000 g e a ha^{-1} os danos poderão não ser apenas transitórios, afetando assim a produtividade da lavoura. E para mitigar, atenuar ou reverter possíveis efeitos deletérios do glyphosate sobre a cultura RR, muitas estratégias têm sido utilizadas, dentre as quais se destaca o uso de produtos para suplementação nutricional (o principal utilizado é o Mn) e biorreguladores (para melhorar o balanço hormonal também).

Ressalta-se que diversos estudos mostram a seletividade de glyphosate para soja RR ou RR2, com efeitos limitando-se à sintomas de injúrias foliares (BOHM et al., 2014; ALBRECHT et al., 2018e; BOSSOLANI et al., 2018; SILVA et al., 2018 a,b). A dose máxima para aplicação única de glyphosate em soja tolerante é 1.440 g e a ha^{-1}, até o estádio fenológico R1 (RODRIGUES; ALMEIDA, 2018), sendo segura até esta dose, como reforçam os trabalhos citados, tanto para soja RR como para RR2.

Para milho, resultados acerca de possíveis efeitos deletérios decorrentes da aplicação de glyphosate são mais escassos, quando em comparação com soja. Em geral não são comuns e evidentes os sintomas de clorose ou outras injúrias nas plantas de milho, como observado por Burke et al. (2008), Reddy et al. (2010), Silva et al.

(2017), Chahal e Jhala (2018), Giovanelli et al. (2018) e Krenchinski et al. (2018a).

Quando observados, como destacado na Tabela 3, os efeitos são para aplicações de glyphosate em doses acima de 1.080 g ea ha^{-1}, com redução em produtividade para dose de 1.080 g ea ha^{-1}, conforme observado por Correia e Santos (2013). Destaca-se que reduções em produtividade, de maneira geral, não são observadas em milho RR para a aplicação de glyphosate, como verificado por Thelen e Penner (2007), Reddy et al. (2010) e Vieira Júnior et al. (2015). A dose máxima recomendada de glyphosate para a aplicação em milho tolerante é de 1.080 g ea ha^{-1} (RODRIGUES; ALMEIDA, 2018), sendo segura até esta dose, como reforçam os trabalhos citados, para milho RR.

Os efeitos negativos de glyphosate sobre algodão tolerante são observados, de maneira geral, na "primeira geração" de algodão RR (evento MON1445). Neste evento, a tolerância a glyphosate é expressa pelo gene *cp4epsps*, e os efeito negativos decorrentes da aplicação de glyphosate podem ser explicados pela baixa expressão desse gene no tecido reprodutor masculino (PLINE et al., 2002). Este problema foi sanado na "segunda geração" de algodão RR (Roundup Ready™ Flex™ - evento MON88913), a qual apresenta maior expressão do gene *cp4epsps* (MAY et al., 2004).

O algodão tolerante a glyphosate (GlyTol® - evento GHB614) apresenta o gene *2mepsps* (GREEN, 2009), neste evento, e assim como observado para algodão RR Flex, não são observados efeitos negativos para a aplicação de glyphosate. A aplicação sequencial, em quatro estádios, de glyphosate (1.300 g ea ha^{-1}) em algodão Glytol®, não provocou sintomas de injúria, bem como não reduziu a produtividade das plantas de algodão (WALLACE et al., 2011). Outros estudos também relatam a tolerância de algodão Glytol® para aplicação de glyphosate em pós-emergência (IRBY et al., 2013; REED et al., 2014; WIGGINS et al., 2017).

Como já mencionando, mas importante sempre ressaltar, culturas tolerantes a glyphosate são uma grande ferramenta para o manejo de plantas daninhas, pela possibilidade em área total e em pós-emergência do glyphosate. Mas o glyphosate não pode ser a única opção, pois a simplificação do manejo leva a problemas, dentre os quais a seleção de biótipos de plantas daninhas resistentes.

4 CULTURAS TOLERANTES A INIBIDORES DA ALS

Em relação aos herbicidas inibidores da ALS, no Brasil, têm-se dois eventos aprovados que conferem tolerância, listados na Tabela 4. Além destes eventos, existem também outras duas tecnologias, a soja tolerante a sulfonilureias (STS®) e a Clearfield®, que não são eventos transgênicos, mas serão abordadas nesta seção.

Tabela 4. Produtos transgênicos aprovados no Brasil, com tolerância a inibidores da ALS.

	Evento	Tecnologia**	Gene	Grupo	Espécie doadora	Aprovação
Soja	CV127	Cultivance®	*csr1-2*	imidazolinonas	*Arabidopsis thaliana*	2009
	DP305423	Treus™ ou Plenish™	*gm-hra**	sulfoniluréias	*Glycine max*	2018

* Gene marcador de seleção.

** Tolerância para estas e outras tecnologias/combinações com estes eventos.

Fonte: ISAAA (2020).

4.1 Culturas tolerantes a imidazolinonas

O termo Cultivance® foi o nome adotado por um sistema lançado pela Embrapa e Basf, que envolvia o uso de eventos de soja tolerantes a herbicidas do grupo das imidazolinonas para o manejo de plantas daninhas de folhas largas e estreitas (ARRABAL, 2015; EMBRAPA, 2015), e apesar de a tecnologia ainda existir, o programa foi descontinuado. As plantas de soja com a tecnologia Cultivance® toleram aplicações em pré e pós-emergência da cultura de herbicidas do grupo químico das imidazolinonas, pertencente ao mecanismo dos inibidores da acetolactato sintase (ALS).

Nas plantas, o gene *csr1-2* executa o controle na síntese de valina, leucina e da isoleucina, que são aminoácidos essenciais. A alteração desse gene não causa impacto nos níveis dos aminoácidos na planta. Assim, a composição do grão final é equivalente ao da soja convencional (VILA-AIUB et al., 2008).

A utilização de herbicidas da classe das imidazolinonas é uma alternativa para rotação com glyphosate, mas os produtos deste grupo normalmente produzem

sintomas de fitointoxicação nas plantas. Quando se realiza a aplicação em plantas suscetíveis, as imidazolinonas inibem a enzima acetolactato sintase (ALS), sendo que a enzima atua na síntese dos aminoácidos de cadeia ramificada a leucina, isoleucina e lisina (OLIVEIRA JÚNIOR., 2011). No entanto, a aplicação de imazethapyr na soja pode prejudicar o cultivo do girassol semeado em sucessão à soja. A persistência no solo de herbicidas que pertencem ao grupo químico das imidazolinonas, como o imazaquin e o imazethapyr, é influenciada por alguns fatores como; o pH, a umidade, o teor de matéria orgânica e a textura do solo (ULBRICH et al., 1998; BRIGHENTI et al., 2002).

A utilização de herbicidas latifolicidas acaba sendo dificultada devido à soja ser uma planta dicotiledônea; desta forma, o herbicida pode causar fitointoxicação, prejudicando o desenvolvimento da cultura. Entretanto, cultivos transgênicos tolerantes a herbicidas, desde que os mesmos sejam bem manejados, podem auxiliar na diminuição das perdas por injúrias (GEHRKE; SHUBIN, 2016; ALBRECHT et al., 2018c).

Foram desenvolvidos poucos trabalhos de pesquisa a campo, mas foram suficientes para traçar potenciais e limitações. As pesquisas em geral avaliaram associações de imazapyr e imazapic, posicionados em pré e pós-emergência da cultura e da planta daninha, em que se diagnosticou a seletividade sobre a cultura e o controle sobre as plantas daninhas (ALBRECHT et al., 2018c). Aplicações nos estádios V1, V2 e V3 de imazapyr 175 g kg^{-1} + imazapic 525 g kg^{-1} não causaram danos significativos aos componentes analisados, até à dose de 300 g ha^{-1} do produto comercial (BIAZOTO, 2017). Portanto, a dose comercial de 150 g ha^{-1} é segura em pós-emergência inicial da cultura, dependendo da condição ambiental (ALBRECHT et al., 2018c). A utilização em pós-emergência da soja (estádio V4) de imazapyr + imazapic (525 g kg^{-1} + 175 g kg^{-1}, respectivamente) na cultura da soja, com doses acima de 150 g pc ha^{-1}, provocou fitotoxidade nas plantas e potencial de redução na produtividade, dependendo da condição ambiental (PEREIRA, 2016; PEREIRA et al., 2016a; PEREIRA et al., 2016b).

O cultivo de genótipos mutagênicos tolerante às imidazolinonas é um sistema bastante utilizado em milho, girassol e arroz (PEREIRA; CARMONA, 2000; PENCKOWSKI et al., 2004). Novamente salienta-se não ser um produto transgênico; o arroz Clearfield® foi desenvolvido através da técnica de mutagênese de semen-

tes através do agente alquilante etilmetanossulfonato (EMS) (CROUGHAN, 2003; SUDIANTO et al., 2013). Esta técnica não causa mutação pela inserção no DNA, mas sim, pela modificação da base já presente (ROGOZIN et al., 2001).

No Estado do Rio Grande do Sul, a tecnologia Clearfield® vem sendo utilizada para o manejo do arroz-vermelho. Mas alguns problemas graves surgiram devido ao cultivo contínuo e errôneo desses genótipos, como a resistência às imidazolinonas em biótipos de arroz-vermelho (MENESES et al., 2009; MENESES et al., 2013). Em 2020, estima-se que esta tecnologia esteja também disponível para a cultura do trigo, manejando espécies como o azevém (*Lolium multiflorum*) e a nabiça (*Rapahnus raphanistrum*).

4.2 Culturas tolerantes a sulfonilureias

O evento DP305423 (Treus™ ou Plenish™) confere à soja a produção de ácidos graxos com perfil modificado. O gene *gm-fad2-1* promove o acúmulo de ácido oleico nos grãos. No processo de seleção deste evento, foi utilizado o gene *gm-hra* como marcador (CIB, 2019b). Este gene, por sua vez, confere tolerância aos herbicidas do grupo das sulfonilureias (GREEN, 2009); entretanto, esta característica não é explorada comercialmente, e não se tem relatos dos efeitos destes herbicidas sobre esta tecnologia.

O gene *gm-hra* está presente também no evento DP356043 (Optimum GAT™), e este gene confere tolerância às sulfonilureias, como tribenuron e nicosulfuron, em soja (GREEN et al., 2008). O evento DP356043 não apresenta aprovação do Brasil. Por sua vez, a soja tolerante a sulfoniluréias (STS®) não se trata de uma cultura transgênica. Foi desenvolvida através da técnica de mutagênese de sementes por meio do agente EMS, assim como o arroz Clearfield®. Sementes mutantes da cultivar de soja 'Williams 82' foram selecionadas de acordo com tolerância à sulfonilureia chlorsulfuron. Assim, foi desenvolvida a cultivar de soja W20 STS, que apresentou elevada tolerância, em pós e pré-emergência, para algumas sulfonilureias (SEBASTIAN et al., 1989), tolerância que é conferida por alelos semidominantes denominados *Als1* e *Als2* (GHIO et al., 2013; WALTER et al., 2014; MANTOVANI et al., 2017).

O alelo *Als1* confere à soja tolerância a chlorimuron, nicossulfuron, rimsulfuron, sulfometuron, thifensulfuron, tribenuron e flucarbazone. O alelo *Als2* confere à soja tolerância a estes mesmos herbicidas e a imazapyr, enquanto a soma dos alelos na mesma planta confere tolerância a estes mesmos herbicidas e a pyrithiobac sodium (WALTER et al., 2014). Cultivares STS® são altamente tolerantes ao herbicida chlorimuron, o qual pode ser aplicado até quatro vezes acima da dose recomendada para cultivares não STS (GREEN, 2007; ROSO; VIDAL, 2011). As cultivares STS® foram lançadas comercialmente, inicialmente, nos Estados Unidos em 1994 (GREEN, 2012). No Brasil, as primeiras cultivares foram lançadas apenas em 2011. Atualmente, tem-se disponível no mercado cultivares que apresentam mutuamente as tecnologias RR (ou RR2) e STS®, possibilitando a associação entre sulfonilureias e glyphosate no manejo de plantas daninhas.

A seguir, é apresentado resumo dos efeitos de sulfonilureias em cultivares STS® (Tabela 5), ressaltando-se que existem diferenças na tolerância entre as cultivares. Segundo Menendez et al. (1994), existem diferenças no nível de resistência em genótipos tolerantes aos herbicidas do grupo das sulfonilureias. Inclusive a suscetibilidade ao chlorimuron pode variar de acordo com o genótipo de soja (MIAN et al., 1997). Portanto, diferentes cultivares STS podem apresentar diferentes níveis de tolerância às sulfonilureias. As associações de glyphosate com sulfonilureias podem ser importantes no manejo de plantas daninhas, assim soja com as tecnologias RR (ou RR2) e STS merece destaque. Contudo ressalta-se os diferentes níveis de seletividade das cultivares STS para as diferentes sulfonilureias, aspecto esse que influencia no manejo de plantas daninhas com estes herbicidas.

A aplicação de glyphosate + chlorimuron (960 g ea ha^{-1} + 25 g ia ha^{-1}) comprometeu o desempenho agronômico de soja não STS (ALBRECHT et al., 2012b), evidenciando os riscos associados com o uso de doses acima das recomendadas para herbicida chlorimuron, em cultivares não STS. A dose máxima recomendada de chlorimuron em soja não STS é de 20 g ia ha^{-1} (RODRIGUES; ALMEIDA, 2018). Mesmo em cultivares STS, maiores doses de chlorimuron devem ser recomendadas com prudência, aplicado em situações específicas no manejo de plantas daninhas.

Neste sentido, ressaltam-se os casos de plantas daninhas resistentes aos herbicidas inibidores da ALS. Ao todo, são 161 espécies com casos relatados de biótipos com resistência a herbicidas deste mecanismo de ação (HEAP, 2019). Antes

do advento das culturas RR, os herbicidas inibidores da ALS eram os mais utilizados em lavouras de grãos; logo, os problemas no manejo de plantas daninhas eram os biótipos com resistência aos inibidores da ALS. Com a adoção das culturas RR, e consequente aumento do uso de glyphosate, os problemas passaram a ser as plantas daninhas com resistência a este herbicida.

Tabela 5. Efeito da aplicação de inibidores da ALS em pós-emergência de cultivares STS®.

Herbicida	Cultivar	Dose*	Injúria (%)	Seletividade	Referência
Chlorimuron	DP 3571	22 + 22	0,0	seletivo	Reddy e Witing (2000)
	Asgrow 3601	13 + 13	0,0	seletivo	Esbenshade et al. (2001)
	Asgrow 4604	11	10,0	seletivo	Nolte e Young (2002)
	CD 2630	20	0,8	seletivo	Silva et al. (2016)
		90	0,0	seletivo	Albrecht et al. (2018f)
		20	0,0	seletivo	Silva et al. (2018c)
	CD 250	60	0,0	seletivo	Albrecht et al. (2017b)
		90	0,0	seletivo	Albrecht et al. (2018f)
	CD 236	90	0,0	seletivo	Albrecht et al. (2018f)
	BMX Turbo	90	0,0	seletivo	Albrecht et al. (2018f)
		20	0,0	seletivo	Silva et al. (2018c)
	DM 61I59	20	0,0	seletivo	Silva et al. (2018c)
	BMX Garra	20	5,5	seletivo	Silva et al. (2018c)
Nicosulfuron	W-20 STS 9122 Asgrow 3200 Asgrow 4045	35	25,0-45,0	seletivo	Manley et al. (2001)
	CD 2630	60	5,5	seletivo	Silva et al. (2016)
		60	11,2	seletivo	Silva et al. (2018c)
		50	15,0	seletivo	Silva et al. (2019)
	CD 250	200	0,0	seletivo	Albrecht et al. (2017b)
	BMX Turbo	60	8,7	seletivo	Silva et al. (2018c)
		50	10,0	seletivo	Silva et al. (2019)
	DM 61I59	60	3,8	seletivo	Silva et al. (2018c)
		50	3,0	seletivo	Silva et al. (2019)
	BMX Garra	60	3,8	seletivo	Silva et al. (2018c)
		50	5,0	seletivo	Silva et al. (2019)
Mts	CD 250	7,2	0,0	seletivo	Albrecht et al. (2017b)
	CD 2630	2,4	32,5	não seletivo	Silva et al. (2016)

Herbicida	Cultivar	Dose*	Injúria (%)	Seletividade	Referência
Cloransulam	CD 2630	40	0,0	seletivo	Silva et al. (2016; 2018c)
	BMX Turbo	40	0,0	seletivo	Silva et al. (2018c)
	DM 61I59	40	1,3	seletivo	Silva et al. (2018c)
	BMX Garra	40	6,0	seletivo	Silva et al. (2018c)
Sulfometuron	SS5911N R2	4	35,0	não seletivo	Jeffries et al. (2014)
	CD 2630	7,5	26,2	seletivo	Silva et al. (2018c)
	BMX Turbo	7,5	32,5	seletivo	Silva et al. (2018c)
	DM 61I59	7,5	2,5	seletivo	Silva et al. (2018c)
	BMX Garra	7,5	13,8	seletivo	Silva et al. (2018c)
Halosulfuron	DP 4112 DP 4888 DP 4919 07-4492 DP 5151 DP 5335 DP 4748 P 95M90 AG 4903	34	7,0-18,0	seletivo	Nandula et al. (2009)

mts: metsulfuron. *Doses em g ia ha^{-1}.

Assim, caso sejam adotados apenas glyphosate e inibidores da ALS, pode ocorrer a seleção de biótipos com resistência a herbicidas destes dois mecanismos, o que já ocorre inclusive. Como, por exemplo, a buva (*C. sumatrensis*), resistente ao chlorimuron, e com resistência múltipla para glyphosate e chlorimuron e *Amaranthis hybridus* no Brasil (HEAP, 2020). Contudo, culturas tolerantes aos inibidores da ALS ainda são importantes por apresentarem maiores possibilidades de uso destes herbicidas, que são eficazes sobretudo no controle de eudicotiledôneas e algumas ciperáceas.

5 CULTURAS TOLERANTES A GLUFOSINATE

Dois são os genes que conferem tolerância a glufosinate, *pat e bar*, proveniente de *Streptomyces viridochromogenes* e *S. hygroscopicus*. Mais detalhes são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Produtos transgênicos aprovados no Brasil, com tolerância a glufosinate.

	Evento	Tecnologia**	Gene	Espécie doadora	Aprovação
Soja	A2704-12 A5547-127	Liberty Link®	*pat*	*Streptomyces viridochromogenes*	2010
	DAS68416-4	Enlist™	*pat*	*S. viridochromogenes*	2015
	DAS44406-6	Enlist E3™	*pat*	*S. viridochromogenes*	2015
	DAS81419	Conkesta™	*pat**	*S. viridochromogenes*	2016
Milho	T25	Liberty Link®	*pat*	*S. viridochromogenes*	2007
	Bt11	Agrisure™ CB/LL	*pat**	*S. viridochromogenes*	2007
	TC1507	Herculex™ I	*pat**	*S. viridochromogenes*	2008
	MZIR098	-	*pat*	S. viridochromogenes	2018
	MON87411	-	*pat*	*S. viridochromogenes*	2018
Algodão	LLCotton25	Liberty Link™	*bar*	*S. hygroscopicus*	2008
	281-24-236 x 3006-210-23	WideStrike™	*pat**	*S. viridochromogenes*	2009
	T304-40 x GHB119	TwinLink™	*bar*	*S. hygroscopicus*	2011
	MON88701	-	*bar*	*S. hygroscopicus*	2017
	81910	Enlist™	*pat*	*S. viridochromogenes*	2018

* Gene marcador de seleção.

** Tolerância para estas e outras tecnologias/combinações com estes eventos.

Fonte: ISAAA (2020).

Ambos os genes codificam a enzima phosphinothricin N-acetyltransferase (PAT), enzima que elimina a atividade herbicida do glufosinate via acetilação (ISAAA, 2019). Destaca-se ainda que, para os eventos em milho Bt11 e TC1507 (resistentes a insetos), e no algodão 281-24-236 x 3006-210-23 (WideStrike™) (resistente a insetos), o gene *pat* foi utilizado como gene marcador no processo de seleção. Contudo, sobretudo para o milho esta característica é explorada pelos agricultores.

A maior adoção destes eventos ocorre em algodão e milho, principalmente para algodão. Para soja, a área cultivada com LL é restrita, entretanto em breve estarão disponíveis tecnologias com tolerância a glufosinate e outros herbicidas, como por exemplo mimetizadores de auxinas. Estes eventos serão abordados em seção específica neste capítulo.

É importante estudar a seletividade sobre cultivos transgênicos e entender os mecanismos de fitointoxicação. A seletividade do glufosinate é garantida para cultivos tolerantes, pelos fabricantes, em doses de bula (de 500 a 700 g ia ha^{-1}). A

utilização contínua e repetitiva contribuiu para o aparecimento de biótipos resistentes e, sabe-se, que doses elevadas de herbicida (fora do recomendado por bula) agravam o problema, além de ocasionar injúrias à cultura de interesse, prejuízos ambientais e aumentar os custos (ALBRECHT et al., 2013; ALBRECHT et al., 2018d).

Em soja LL, os efeitos negativos da aplicação de glufosinate resumem-se a sintomas de injúria visuais. Como observado por Aulakh e Jhala (2015), com sintomas de injúria de até 15% para a aplicação de glufosinate (740 g ia ha^{-1}) no estádio V2, com aplicação sequencial em V6 na dose de 593 g ia ha^{-1}, Beyers et al. (2002) observaram sintomas de até 21% para aplicação de glufosinate em associações. Entretanto, outros estudos não relatam sintomas de injúria e reduções em produtividade para a aplicação de glufosinate (VC ao final do estádio vegetativo) (REDDY et al., 2010; CHAHA; JHALA, 2015; LANDRY et al., 2016; BARNES et al., 2017; JHALA et al., 2017).

Para o milho tolerante, também não são observados maiores efeitos negativos para a aplicação de glufosinate. Em geral, os efeitos resumem-se a sintomas de injúria (ARMEL et al., 2008), que está relacionada ao aumento dos teores de amônia nos tecidos vegetais após a aplicação (KRENCHINSKI et al., 2018b). Em relação à produtividade, não são observadas reduções, como verificado por Armel et al. (2008), Ganie e Jhala (2017), Silva et al. (2017), Costa et al. (2018), Krenchinski et al. (2018a), entre outros.

O milho com resistência a insetos (eventos Bt11 e TC1507) também apresenta tolerância ao glufosinate, uma vez que o gene *pat* foi utilizado como marcador em seu processo de seleção. Por exemplo, as tecnologias transgênicas com tolerância a insetos Agrisure® Duracade™ 5222, Agrisure® Viptera™ 2100 (Viptera™2), Agrisure® Viptera™ 3100, Agrisure® Viptera™ 3110 (Viptera™3), Agrisure® Viptera™ 3111 (Viptera™4), Agrisure™ CB/LL (TL), SmartStax™, Herculex™ I, Leptra®, Optimum™ Intrasect, Power Core™, entre outras combinações destas, são tolerantes ao glufosinate devido ao gene *pat* no processo de seleção (KRENCHINSKI et al., 2018b; ISAAA, 2020).

De acordo com Krenchinski et al. (2018b), a expressão do gene *pat* é proporcional ao nível de tolerância ao glufosinate. A expressão do gene *pat* apresentou-se da seguinte forma: Leptra > Power Core > Herculex I Yieldgard >> Herculex I > Agrisure TL = Viptera 3. Portanto, pode haver diferenças nos efeitos decorrentes

da aplicação de glufosinate em milho. Sobretudo maiores sintomas de injúria para as tecnologias com menor expressão do gene *pat*, mas os estudos não chegam a apontar diferenças em produtividade.

Já Carbonari et al. (2016) compararam duas cultivares de algodão e observaram que a cultivar FM 975 WS apresentou níveis muito menores da enzima PAT, o que significa que as doses suportadas por essa cultivar são menores do que as suportadas pela cultivar IMACD 6001 LL. Ressalta-se que, na tecnologia WideStrike™ (que confere resistência a insetos), a enzima PAT é codificada pelo gene *pat*, que foi utilizado como marcador no processo de seleção, enquanto a tecnologia Liberty Link™ foi desenvolvida com a finalidade de conferir tolerância a glufosinate em algodão, e a enzima PAT é codificada pelo gene *bar*.

A aplicação de glufosinate foi seletiva para algodão tolerante *(bar* transformado) (WIGGINS et al., 2017), enquanto para algodão WideStrike™ são observados sintomas de injúria para aplicação de glufosinate, contudo sem reduções em produtividade (WRIGHT et al., 2014; BARNETT et al., 2015). A dose máxima recomendada de glufosinate em algodão tolerante é de 700 g ia ha^{-1} (RODRIGUES; ALMEIDA, 2008), acima da qual podem ser observados efeitos indesejáveis, tanto para algodão com gene pat, como com bar (DODDS et al., 2015).

Em termos gerais, a inserção do gene *pat* fornece um nível de tolerância ao glufosinate (CARBONARI et al., 2016). O gene *pat* metaboliza rapidamente o glufosinate em NAG e MPB (LATORRE, 2014), por isso plantas com a tecnologia LL possuem capacidade de se recuperar das injúrias causadas pelo herbicida (KRENCHINSKI, 2018b). Tanto Carbonari et al. (2016) como Krenchinski (2018b) concluem que a expressão do gene *pat* é proporcional ao nível de resistência de cada tecnologia nas variedades de algodão e híbridos de milho, respectivamente.

Após considerações sobre a seletividade do glufosinate nas culturas, destaca-se que este herbicida apresenta amplo espectro de controle de plantas daninhas, e derivado de uma toxina fúngica do gênero *Streptomyces* (BARBERIS, 2012), considerado um herbicida não seletivo de ação total. Com relação às alterações metabólicas, o glufosinate atua inibindo a glutamina sintetase, responsável pela transformação da amônia ou amônio (NH_3 ou $NH4^+$) nas células durante o metabolismo do nitrogênio. Este processo resulta em acúmulo de amônia (o) na célula, levando à diminuição na produção de aminoácidos, destruição de cloroplastos, inibição da

fotossíntese, morte celular, amarelecimento das folhas, murcha e morte da planta (SAUER et al., 1987; RODRIGUES; ALMEIDA, 2018).

A eficácia de glufosinate é dependente de condições ambientais. Segundo Anderson et al. (1993), fatores como baixa temperatura e baixa umidade relativa diminuem a eficácia do herbicida, devido à planta diminuir seu metabolismo sob estas condições. Estes fatores influenciam no processo de absorção e translocação do herbicida na planta (COETZER et al., 2001), destacando-se a importância das horas de luz para sua efetiva performance. O herbicida glufosinate não apresenta efeito pré-emergente, pois não apresenta efeito residual para o controle de plantas daninhas (RITTER; MENBERE, 2001), e sua associação com outros produtos é promissora (MASCHHOFF et al., 2000).

O glufosinate é considerando uma molécula pós-patente (MAPA, 2019) e possui registro para algumas das principais plantas daninhas mais problemáticas, como: capim-colchão, capim-amargoso, buva, trapoeraba, caruru, poaia, entre outras. Em muitos casos, o alvo do glufosinate serão plantas daninhas com biótipos resistentes, como os expressivos casos de resistência a glyphosate, outro herbicida de amplo espectro e seletivo à soja RR (ALBRECHT et al., 2018d).

Para buva, Oliveira Neto et al. (2010) realizaram um experimento para o controle químico de plantas daninhas do gênero *Conyza* e constataram controles satisfatórios das plantas com o herbicida glufosinate. Tal fato corrobora as considerações de Nardi (2015) e Albrecht et al. (2017a). Em termos gerais, os ensaios demonstraram que o glufosinate possui alta eficiência no controle de buva entre 6 a 8 cm, respondendo linearmente em performance ao incremento de dose, observando-se que para capim-amargoso, os melhores controles foram para plantas com até dois perfilhos (ALBRECHT et al., 2018d).

Considera-se assim o glufosinate uma ótima opção no controle de plantas daninhas complexas, que pode ser utilizado em soja, milho e algodão geneticamente modificados, sendo segura a aplicação para as culturas, nas doses e estádios recomendados. Ressalta-se ainda, que para milho e algodão, têm-se tecnologias comerciais que conferem tolerância a glyphosate e glufosinate, simultaneamente. As considerações feitas anteriormente para as associações de inibidores da ALS e glyphosate também são feitas aqui para as associações de glufosinate e glyphosate.

6 TOLERÂNCIA A MIMETIZADORES DE AUXINAS

Novos eventos foram aprovados no Brasil, os quais conferem tolerância a herbicidas mimetizadores de auxina, para soja, milho e algodão (Tabela 7). Estes novos eventos combinam, como já mencionado, e apresentam tolerância a mais de um herbicida, como, por exemplo, o evento DAS44406-6 que confere tolerância a glyphosate, glufosinate e 2,4-D em soja. Estas novas tecnologias são apresentas separadamente a seguir.

Tabela 7. Produtos transgênicos aprovados no Brasil, com tolerância a mimetizadores de auxina.

	Evento	Tecnologia**	Gene	Herbicida	Espécie doadora	Aprovação
Soja	DAS68416-4	Enlist™	*aad-12*	2,4-D	*Delftia acidovorans*	2015
	DAS44406-6	Enlist E3™	*aad-12*	2,4-D	*D. acidovorans*	2015
	MON87708	Roundup Ready™ 2 Xtend™	*dmo*	dicamba	*Stenotrophomonas maltophilia*	2016
Milho	DAS40278	Enlist™	*aad-1**	2,4-D	*Sphingobium herbicidovorans*	2015
	MON87411	-	*dmo*	dicamba	*S. maltophilia*	2018
Algodão	MON88701	-	*dmo*	dicamba	*S. maltophilia*	2017
	81910	Enlist™	*aad-12*	2,4-D	*D. acidovorans*	2018

*Confere tolerância também aos herbicidas do grupo dos aryloxyphenoxypropionatos.
** Tolerância para estas e outras tecnologias/combinações com estes eventos.
Fonte: ISAAA (2020).

6.1 Culturas tolerantes a 2,4-D

O evento DAS44406-6 (Enlist™ E3) confere em soja tolerância aos herbicidas glyphosate, 2,4-D e glufosinate, aprovado no Brasil em 2015. Em 2017, foi aprovado o evento DAS81419 x DAS4440-6 (Conkesta Enlist™ E3) que, além da tolerân-

cia aos herbicidas, apresenta resistência a lepidópteros (ISAAA, 2020). A tolerância ao glyphosate, 2,4-D e glufosinate é, respectivamente, conferida pelas enzimas: duplo mutante EPSPs, aryloxyalkanoate dioxygenase-12 e phosphinothricin acetyltransferase (LEPPING et al., 2013). A enzima duplo mutante EPSPs é codificada por gene *epsps* que sofreu dupla mutagênese (*2mepsps*). A enzima aryloxyalkanoate dioxygenase-12 é codificada pelo gene *aad-12*, enquanto a enzima phosphinothricin acetyltransferase é codificada pelo gene *pat*, mesmo gene presente em soja LL.

Além desta tecnologia, foi desenvolvida nova formulação de herbicida que possui em sua composição 2,4-D colina e glyphosate, 195 e 205 g ea L^{-1}, respectivamente. A aplicação pode ser realizada até o estádio R2 da soja tolerante, com dose máxima de 2.185 g ea ha^{-1} (CHAHAL et al., 2015). Outras formulações de 2,4-D não estão autorizadas para uso (PETERSON et al., 2016).

Poucos ainda são os estudos acerca de possíveis efeitos negativos para a aplicação de 2,4-D, isolado ou em associações com glyphosate e glufosinate em soja tolerante. Os sintomas de injúria, quando observados, são baixos e sem reduções em produtividade (ROBINSON et al., 2015; MILLER; NORSWORTHY, 2016; SCHRYVER et al., 2017; FRENE et al., 2018).

Para milho, tem-se o evento DAS40278 (Enlist™) que apresenta tolerância a 2,4-D, e o gene *aad-1* também confere tolerância aos herbicidas do grupo dos aryloxyphenoxypropionatos, por exemplo, haloxyfop (ISAAA, 2020). Outros eventos devem ser aprovados comercialmente no Brasil, que além de tolerantes a 2,4-D, haloxyfop, serão também a glyphosate e glufosinate. Acerca da seletividade, têm-se resultados para aplicação de 2,4-D e glyphosate, em que a aplicação dos dois herbicidas foi seletiva para milho tolerante (RUEN et al., 2017).

Assim como o evento MON89034 x TC1507 x NK603 x DAS40278 não foi afetado negativamente pela aplicação de 2,4-D + glyphosate (1.170 +1.025 g ea ha^{-1}) em aplicações até o estádio V10, bem como não foi afetado pela aplicação de haloxyfop (182 g ea ha^{-1}) no plantio e mais duas aplicações sequenciais até V10, na dose de 73 g ea ha-1 (CERQUEIRA et al., 2017). Ainda são poucos os estudos a campo que avaliem a seletividade e a eficácia de 2,4-D, glyphosate e glufosinate, sobretudo em associações nestes novos eventos disponíveis para milho.

Também para o algodão, tem-se a tolerância a 2,4-D, com o mesmo gene que confere tolerância em eventos para soja. O evento 81910 (Enlist™), aprova-

do no Brasil, apresenta também tolerância a glufosinate, devido ao gene *pat* (CIB, 2019b). Estudos sobre os efeitos de 2,4-D em algodão tolerante são escassos ainda. O evento 81910 foi aprovado para cultivo nos Estados Unidos em 2015, e no Brasil em 2018, mas ainda sem liberação comercial (CIB, 2019b; ISAAA, 2020).

6.2 Culturas tolerantes a dicamba

O evento MON87708 (Roundup Ready™ 2 Xtend™) confere tolerância aos herbicidas glyphosate e dicamba, sendo aprovado no Brasil em 2016. O MON87708 x MON89788 x A5547-127 (ainda sem nome comercial) além destes herbicidas, também confere tolerância a glufosinate, sendo que este evento ainda não está autorizado no Brasil (ISAAA, 2020).

A tolerância ao glyphosate é conferida pelo gene *cp4epsps*, mesmo gene presente na soja RR. A tolerância ao dicamba é conferida pelo gene *dmo*, proveniente de *Stenotrophomonas maltophilia* (BEHRENS et al., 2007). Byker et al. (2013) observaram eficácia de glyphosate (900 g ea ha^{-1}) + dicamba (300 g ea ha^{-1}), em pré-plantio com sequencial em pós-emergência, no controle de plantas daninhas, assim como a seletividade para soja tolerante. De modo semelhante, Underwood et al. (2016) verificaram a eficácia e a seletividade de glyphosate (900 g ea ha^{-1}) + dicamba (600 g ea ha^{-1}), associados a graminicidas, em soja tolerante.

A soja Roundup Ready™ 2 Xtend™ também foi tolerante para a aplicação de glyphosate + dicamba, assim como a associação foi eficaz no controle de plantas daninhas (PETERSON et al., 2017; OWEN et al., 2018). Muito ainda precisa ser estudado sobre a seletividade e o controle; no entanto, espera-se alcançar resultados positivos no MIPD, observando que o dicamba é um herbicida de alta performance no controle de algumas plantas daninhas, como a buva. Porém, cuidados como a volatilidade, deriva e limpeza de pulverizadores deverão ser considerados nas boas práticas agrícolas, no manejo do dicamba.

A tecnologia Xtend™ também estará disponível no Brasil para algodão, e além da tolerância ao dicamba, apresentará também ao glyphosate e glufosinate. Vann et al. (2017) verificaram a eficácia de dicamba (560 g ea^{-1}) + glufosinate (590 g ha^{-1}) em diferentes programas de manejo *Amaranthus palmeri*, assim como a seleti-

vidade para as plantas de algodão; entretanto, foram observados sintomas de injúria e até reduções em produtividade para aplicações nos estádios reprodutivos.

Os herbicidas 2,4-D e dicamba pertencem ao grupo dos mimetizadores de auxina. Este grupo tem grande importância histórica, já que o 2,4-D foi o primeiro composto orgânico sintetizado industrialmente como herbicida seletivo. Estes herbicidas apresentam maior ação sobre plantas daninhas eudicotiledôneas, enquanto a tolerância das gramíneas se dá por uma translocação limitada via floema e estruturas anatômicas (OLIVEIRA JÚNIOR, 2011; PETERSON et al., 2016). Entre as principais plantas daninhas suscetíveis a estes dois herbicidas, estão *C. bonariensis e Amaranthus sp*., estas plantas daninhas que estão entre as mais problemáticas em lavouras de soja, milho e algodão.

Assim, devido à possibilidade da utilização de outros herbicidas, além de glyphosate, os eventos tolerantes a 2,4-D e dicamba podem ser alternativas no controle e na prevenção da seleção de plantas daninhas resistentes a glyphosate, uma vez que associação e rotação de herbicidas de diferentes mecanismos de ação são importantes neste sentido.

Outros estudos também destacam a eficácia de 2,4-D e dicamba, isolados ou associados ao glyphosate, no controle de plantas daninhas. Como observado por Osipe et al. (2017) para o controle de *Richardia brasiliensis*, *Commelina benghalensis*, *C. bonariensis e Ipomoea nil*, com maior eficácia de 2,4-D para o controle de *R. brasiliensis*, *C. benghalensis e I. nil*, e com maior eficácia de dicamba para o controle de *C. bonariensis*. Montgomery et al. (2017) também observaram a eficácia no controle de *C. canadensis* para aplicação de 2,4-D ou dicamba. Meyer et al. (2015) verificaram a eficácia para o controle de *Amararanthus sp*. No entanto, como é uma tecnologia nova no Brasil e ainda não liberada comercialmente, muito ainda será revelado em termos de potencialidades e desafios, sendo certo que tal tecnologia se posiciona como mais uma ferramenta efetiva no MIPD da soja, milho e algodão.

7 PERSPECTIVAS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto, a utilização de eventos transgênicos com tolerância a herbicidas é uma alternativa relevante no MIPD. Relacionado com a quebra na

sequência de aplicações de glyphosate durante todo o ciclo das culturas RR, pode ser um ponto favorável para evitar o aparecimento de novos biótipos de espécies de plantas daninhas com resistência e também auxiliar no controle das que já possuem biótipos resistentes ou que são tolerantes.

Acredita-se que essas transgenias, como a de tolerância a imidazolinonas, poderão ser utilizadas no futuro, associadas a outras tecnologias transgênicas, o que poderá, em muito, favorecer o MIPD, como acontecerá em breve, em termos comerciais, com as tecnologias Enlist™ e Xtend™.

A tecnologia de tolerância a glufosinate já está presente em vários híbridos de milho e é marcante no manejo da cultura do algodão no Brasil. Apesar de liberada pela CTNBio e comercialmente, ainda não há, em 2020, a soja LL disponível em escala para os produtores, no entanto, a expectativa é grande. Essa perspectiva favorável concentra-se nos anseios do setor produtivo, sobretudo no tocante ao controle de plantas daninhas com biótipos resistentes, seja a glyphosate, a paraquat, a herbicidas inibidores da ALS, entre outros.

Com a tecnologia Enlist™, por exemplo, chegará ao produtor soja tolerante ao glufosinate, glyphosate e 2,4-D. No caso do milho, haverá também tolerância a graminicidas do grupo dos fop's. Outro aspecto a se destacar é a aquisição pela Basf da plataforma de controle de plantas daninhas associada ao herbicida Liberty®, à base de glufosinate. Salienta-se ainda o fato de que o glufosinate é um herbicida pós-patente, o que tornará factível sua comercialização por muitas empresas do segmento de agroquímicos, possivelmente barateando seu valor de mercado. Elementos como os supramencionados vislumbram a viabilização e o aumento de desempenho do controle químico no MIPD.

A presença de novos produtos, assim como a tolerância a auxínicos, a exemplo do 2,4-D e dicamba, e tolerância a inibidores da síntese de carotenoides ([FG72 x A55547-I27] Liberty Link® GT27™ - soja geneticamente modificada para tolerância a três herbicidas: glyphosate + glufosinate + isoxaflutole), nos sistemas produtivos, envolvendo grandes culturas, propiciará mais uma ferramenta no controle de plantas daninhas com herbicidas. Porém, atenção deverá ser direcionada à rotação, não só de culturas, mas também de eventos transgênicos, para que seja possível o manejo da soja, milho e algodão espontâneos e a devida rotação de mecanismos de ação dos herbicidas. Por fim, considerando a alta performance do her-

bicida glufosinate, 2,4-D e dicamba em diversas plantas daninhas, cuidado deverá ser dado à pressão de seleção e ao seu uso em pós-emergência da cultura tolerante, que possui um limite em termos de seletividade.

Um ponto a ser destacado será o manejo de plantas daninhas voluntárias, pois estarão disponíveis tecnologias com tolerância a três mecanismos de ação, e no caso do milho, até a quatro mecanismos. Ou ainda a destruição química dos restos culturais de algodão tolerante a 2,4-D ou dicamba. Assim o MIPD ganha ainda mais importância.

Além dos cultivos transgênicos, vale destacar a possibilidade de outras biotecnologias que poderão ser empregadas na agricultura, associadas ao MIPD, como é o caso do CRISPR-Cas9 (é um acrônimo para Grupos de Repetições Palindrômicas Curtas Regularmente Espaçadas - Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeat) e do RNAi (RNA interferente). Como aplicações no controle de plantas daninhas, o RNAi pode ser utilizado para silenciar genes, elevando (por exemplo) a suscetibilidade de plantas daninhas a herbicidas ou à morte destas plantas. Quanto ao CRISPR-Cas9, considerando a edição gênica, pode-se pegar uma espécie resistente a um herbicida e torná-la suscetível ou tornar uma planta fisiologicamente inativa, perdendo a briga com outras espécies daninhas ou cultivadas pelos recursos do meio ambiente.

Porém, nem os transgênicos, o CRISPR-Cas9 e o RNAi, nem outra estratégia usada isoladamente, vai resolver o problema da lavoura. Na luta contra as plantas daninhas, o MIPD é essencial, e todas as práticas têm seu devido lugar.

REFERÊNCIAS

ABREU A. B. G. et al. Desenvolvimento e validação de método de análise de glifosato em grãos de soja. **Quím Nova**, v. 31, n. 1, p. 5-9, 2008.

ADEGAS F. S. et al. **Impacto econômico da resistência de plantas daninhas a herbicidas no Brasil**. Circular Técnico 132, 2017.

AGOSTINETTO D. et al. Respostas de cultivares de soja transgênica e controle de

plantas daninhas em função de épocas de aplicação e formulações de glyphosate. **Planta Daninha**, v. 27, n. 4, p. 739-746, 2009.

ALBRECHT, A. J. P. et al. Behavior of RR soybeans subjected to different formulations and rates of glyphosate in the reproductive period. **Planta Daninha**, v. 32, n. 4, p. 851-859, 2014a.

ALBRECHT A. J. P. et al. Buva resistente a herbicidas: controle deve ser imediato. **Rev Campo Negócios**, v. 14, p. 48-49, 2018a.

ALBRECHT A. J. P. et al. Capim-amargoso: uma planta daninha de difícil controle. **Rev Campo Negócios**, v. 15, p. 40-45, 2018b.

ALBRECHT A. J. P. et al. Effect of sulfonylureas application on RR/STS soybean. **Braz J Agric**., v. 92, p. 37-49, 2017b.

ALBRECHT A. J. P.; ALBRECHT, L. P.; PELLIZZARO, E. C. Dessecação antecipada melhora a semeadura de grãos. **Rev Campo Negócios**, v. 34, p. 12-15, 2017a.

ALBRECHT A. J. P., et al. Glyphosate tolerant soybean response to different management systems. **J Agric Sci**. v. 10, n. 1, p. 204-216, 2018e.

ALBRECHT, L. P. et al. Effect of glyphosate and associations in post-emergence on the agronomic performance and quality of RR® soybean seeds. **Planta Daninha**, v. 30, n. 1, p. 139-146, 2012b.

ALBRECHT, L. P. et al. Performance of Roundup Ready soybean under glyphosate application at different stages. **Planta Daninha**. v. 29, n. 3, p. 585-590, 2011.

ALBRECHT, L. P. et al. RR soybean seed quality after application of glyphosate in different stages of crop development. **Rev Bras Sem**., v. 34, n. 3, p. 373-381, 2012a.

ALBRECHT, L. P. et al. Soja transgênica LibertyLink e o seu manejo. **J Agron Sci**., v.

7, p. 33-42, 2018d.

ALBRECHT, L. P. et al. Soja transgênica tolerante a imidazolinonas: passado, presente e futuro. **J Agron Sci**., v. 7, p. 24-32, 2018c.

ALBRECHT, L. P. et al. The role of glyphosate in RR soybean production and seed quality. **Planta Daninha**, v. 32, n. 2, p. 401-407, 2014a.

ALBRECHT, L. P.; ALBRECHT, A. J. P.; VICTORIA FILHO, R. Soja RR e o Glyphosate. In: ALBRECHT, L. P.; MISSIO, R. F. **Manejo de cultivos transgênicos**. Palotina: Editora UFPR, 2013. p. 25-45.

ALBRECHT, L. P. et al. Rates of chlorimuron applied in glyphosate-tolerant and sulfonylurea-tolerant soybean. **J Crop Sci Biotechnol**., v. 21, p. 211-216, 2018e.

ANDERSON, D. M. et al. The influence of temperature and relative humidity on the efficacy of glufosinate-ammonium. **Weed Res**., v. 33, n. 2, p. 139-147, 1993.

ARAUJO, G. V. **Altas doses de glyphosate e amônio-glufosinato em milho com as tecnologias RR2 e LL**. (Trabalho de Conclusão de Curso). Palotina: Universidade Federal do Paraná, 2018.

ARMEL, G. R. et al. Mesotrione and glufosinate in glufosinate-resistant corn. **Weed Technol**., v. 22, n. 4, p. 591-596, 2008.

ARRABAL, **C. A. Primeira soja transgênica totalmente brasileira chega ao mercado**. Online. 2015. Disponível em: <https://www.embrapa.br/web/mobile/noticias/-/noticia/4693328/primeira-soja-transgenica-totalmente-brasileira-chega-ao-mercado>. Acesso em: 27 Jul. 2016.

AULAKH, J. S.; JHALA, A.J. Comparison of glufosinate-based herbicide programs for broad-spectrum weed control in glufosinate-resistant soybean. **Weed Technol**., v. 29, n. 3, p. 419-430, 2015.

BARBERIS, L. R. M. **Metodologia para determinação de efeitos fisiológicos e metabólicos do glufosinate em soja**. 2012. Tese (Doutorado). Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", UNESP, Botucatu, 2012.

BARBOSA, K. A. G. et al. Interação entre herbicidas e cultivares de soja sobre o nematoide de cisto *Heterodera glycines*. **Biosci J**., v. 30, n. 1, p. 154-163, 2014.

BARNES, E. R. et al. Control of glyphosate-resistant common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) in glufosinate-resistant soybean *Glycine max* (L.) Merr. **Front Plant** Sci., v. 8, 1445 p., 2017.

BARNETT, K. A. et al. Evaluation of WideStrike cotton response to repeated applications of glufosinate at various application timings. **Weed Technol**., v. 29, n. 1, p. 154-160, 2015.

BEHRENS, M. R. et al. Dicamba resistance: enlarging and preserving biotechnology-based weed management strategies. **Science**, v. 316, p. 1185-1188, 2007.

BEYERS, J. T. et al. Weed management programs in glufosinate-resistant soybean (*Glycine max*). **Weed Technol**., v. 16, n. 2, p. 267-273, 2002.

BIAZOTO, F. S. **Desempenho da soja Cultivance® submetida ao herbicida Soyvance pré®**. 2017. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Maringá, Umuarama, 2017.

BOHM, B. et al. Glyphosate effects on yield, nitrogen fixation, and seed quality in glyphosate-resistant soybean. **Crop Sci**., v. 54, n. 4, p. 1737-1743, 2014.

BOSSOLANI, J. W. et al. Development of RR soybean in function of glyphosate doses and Bradyrhizobium inoculation. **Rev Bras Eng Agric Ambient**., v. 22, n. 12, p. 854-858, 2018.

BRIGHENTI, A. M. et al. Tolerância de genótipos de soja aos herbicidas trifluralin e imazaquin. **Planta Daninha**, v. 20, n. 1, p. 63-69, 2002.

BURKE, I. C. et al. A comparison of weed control in herbicide-resistant, herbicide-tolerant, and conventional corn. **Weed Technol**., v. 4, n. 22, p. 571-579, 2008.

BYKER, H. P. et al. Control of glyphosate-resistant horseweed (*Conyza canadensis*) with dicamba applied preplant and postemergence in dicamba-resistant soybean. **Weed Technol**., v. 27, n. 3, p. 492-496, 2013.

CAETANO, M. S. **Análise das estruturas nativas e mutante Gli96Ala da PSP sintase via ancoramento molecular in silico com inibidores e estudo mecanístico**. 2009. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

CARBONARI, C. A. et al. Resistance to glufosinate is proportional to phosphinothricin acetyltransferase expression and activity in Liberty Link® WideStrike® cotton. **Planta**, v. 243, n. 4, p. 925-933, 2016.

CARVALHO, L. B. et al. Differential response of corn and soybean RR crops to exposure to glyphosate and phosphate fertilization. **Planta Daninha**, v. 4, n. 33, p. 751-758, 2015.

CAVALIERI, S. D. et al. Acúmulo de nutrientes e matéria seca na parte aérea de dois cultivares de soja RR sob efeito de formulações de glyphosate. **Planta Daninha**, v. 30, n. 2, p. 349-358, 2012.

CERQUEIRA, D. T. R. et al. Agronomic performance of insect-protected and herbicide-tolerant MON 89034 × TC1507 × NK603 × DAS-40278–9 corn is equivalent to that of conventional corn. **GM Crops Food**, v. 8, n. 3, p. 149-155, 2017.

CESCO, V. J. S. et al. Agronomic performance of Intacta RR2 soybean submitted to doses of glyphosate. **Planta Daninha**, v. 36, e. 018168727, 2018.

CHAHAL, O. S.; JHALA, A. J. Economics of management of photosystem II- and HPPD-inhibitor-resistant palmer amaranth in corn. **Agron J**., v. 110, p. 1905-1914, 2018.

CHAHAL, P. S. et al. Growth stage affects dose response of selected glyphosate-resistant weeds to premix of 2,4-D choline and glyphosate (Enlist Duo™ herbicide). **J Agric Sci**., v. 7, n. 1, p. 1–10, 2015.

CHAHAL, P. S.; JHALA, A. J. Herbicide programs for control of glyphosate-resistant volunteer corn in glufosinate-resistant soybean. **Weed Technol**., v. 29, n. 3, p. 431-443, 2015.

COETZER, E. et al. Glufosinate efficacy, absorption, and translocation in amaranth as affected by relative humidity and temperature. **Weed Sci**., v. 49, n. 1, p. 8-13, 2001.

CONSELHO DE INFORMAÇÕES SOBRE BIOTECNOLOGIA - CIB. **Conceitos**. Online. 2019a. Disponível em:< https://cib.org.br/explore-os-conceitos/>. Acesso em: 17 fev. 2019.

CONSELHO DE INFORMAÇÕES SOBRE BIOTECNOLOGIA - CIB. **Produtos Aprovados**. Online. 2019b. Disponível em:< https://cib.org.br/produtos-aprovados/>. Acesso em: 10 mai. 2019.

CORREIA, N. M.; SANTOS, E. A. Foliar levels of macro and micronutrients in glyphosate-tolerant corn submitted to herbicides. **Semina. Cienc Agrar**., v. 34, p. 3165-3171, 2013.

COSTA, F. R. et al. Lack of effects of glyphosate and glufosinate on growth, mineral content, and yield of glyphosate-and glufosinate-resistant maize. **GM Crops Food**., v. 9, n. 4, p. 189-198, 2018.

CROUGHAN, T. P. Clearfield rice: It's not a GMO. **Louisiana Agric**., v. 46, n. 4, p.

24-26, 2003.

CUNHA, R. A. J. P.; ALVES, G. S. Características físico-químicas de soluções aquosas com adjuvantes de uso agrícola. **Interciencia**, v. 34, n. 9, p. 655-659, 2009.

DODDS, D. M. et al. Response of LibertyLink and WideStrike cotton to varying rates of glufosinate. **Weed Technol.**, v. 29, n. 4, p. 665-674, 2015.

DUKE, S. O. The history and current status of glyphosate. **Pest Manag Sci.**, v. 74, n. 5, p. 1027-1034, 2018.

EMBRAPA. **Sistema Cultivance ideal para a rotação de tecnologias na cultura da soja**. Online. 2015. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/1355202/1529289/Publica%C3%A7%C3%A3o_Sistema_Cultivance.pdf/a44c53ae-eab1-4b47-afdf-3c487558338e>. Acesso em: 27 ago. 2016.

ESBENSHADE, W. R. et al. Effect of tillage, row spacing, and herbicide on the emergence and control of burcucumber (*Sicyos angulatus*) in soybean (*Glycine max*). **Weed Technol**., v. 15, n. 2, p. 229-235, 2001.

FRENE, R. L. et al. Enlist E3™ soybean sensitivity and Enlist™ herbicide-based program control of sumatran fleabane (*Conyza sumatrensis*). **Weed Technol**., v. 32, n. 4, p. 1-8, 2018.

GANIE, Z. A.; JHALA, A. J. Interaction of 2,4-D or dicamba with glufosinate for control of glyphosate-resistant giant ragweed (*Ambrosia trifida* L.) in glufosinate-resistant maize (*Zea mays* L.). **Front Plant Sci**., v. 8, 1207 p., 2017.

GAZZIERO, D. L. P.; NEUMAIER, N. **Sintomas e diagnose de fitotoxidade de herbicidas na cultura da soja**. Londrina: EMBRAPA-CNPSo, 1985.

GEHRKE, A. R.; SHUBIN, N. H. Cis-regulatory programs in the development and evolution of vertebrate paired appendages. **Semin Cell Dev Biol**., v. 57, n. 1, p. 31-

39, 2016.

GHIO, C. et al. Molecular characterization of *Als1*, an acetohydroxyacid synthase mutation conferring resistance to sulfonylurea herbicides in soybean. **Theor Appl Genet**., v. 126, n. 12, p. 2957-2968, 2013.

GIOVANELLI, B. F. et al. Selectivity of herbicides applied separately or in combination in the post emergence of RR2 maize. **Braz J Agric**., v. 93, n. 1, p. 47-57, 2018.

GREEN, J. M. et al. New multiple-herbicide crop resistance and formulation technology to augment the utility of glyphosate. **Pest Manag Sci**., v. 64, n. 4, p. 332-339, 2008.

GREEN, J. M. Review of glyphosate and ALS-inhibiting herbicide crop resistance and resistant weed management. **Weed Tecnol**., v. 21, n. 2, p. 547-558, 2007.

GREEN, J. M. The benefits of herbicide - resistant crops. **Pest Manag Sci**. v. 68, n. 10, p. 1323-1331, 2012.

GREEN, J.M. Evolution of glyphosate-resistant crop technology. **Weed Sci**., v. 57, n. 1, p. 108-117, 2009.

HEAP, I. **The international survey of herbicide resistants weeds**. 2020. Online. Disponível em: <www.weedscience.org>. Acesso em: 23 jun. 2020.

INTERNATIONAL SERVICE FOR THE ACQUISITION OF AGRI-BIOTECH APPLICATIONS - ISAAA. **GM Crop Events approved in Brazil. Online**. 2020. Disponível em: <http://www.isaaa.org/gmapprovaldatabase/>. Acesso em: 23 jun. 2020.

IRBY, J. T. et al. Evaluation of GlyTol™ and GlyTol™ + LibertyLink® cotton in the mid-south. **J Cotton Sci**., v. 17, n. 2, p. 131–139, 2013.

JAKELAITS, A. et al. Controle de *Digitaria horizontalis* pelos herbicidas glyphosate,

sulfosate e glifosate potássico submetidos a diferentes intervalos de chuva após a aplicação. **Planta Daninha**., v. 19, n. 2, p. 279-285, 2001.

JEFFRIES, M. D. et al. Effect of simulated indaziflam drift rates on various plant species. **Weed Technol**., v. 28, n. 4, p. 608-616, 2014.

JHALA, A. J. et al. Control of glyphosate-resistant common waterhemp (*Amaranthus rudis*) in glufosinate-resistant soybean. **Weed Technol**., v. 31, n. 1, p. 32-45, 2017.

JONES, M. A.; SNIPES, C. E. Tolerance of transgenic cotton to topical applications of glyphosate. **J Cotton Sci**., v. 3, p. 19-26, 1999.

KRENCHINSKI, F. H. et al. Glufosinate resistance level is proportional to phosphinothricin acetyltransferase gene expression in glufosinate-resistant maize. **J Agric Food Chem**., v. 66, n. 48, p. 12641-12650, 2018b.

KRENCHINSKI, F. H. et al. Glyphosate affects chlorophyll, photosynthesis and water use of four Intacta RR2 soybean cultivars. A**cta Physiol Plant**., v. 39, n. 2, 63 p., 2017.

KRENCHINSKI, F. H. et al. Post-emergent applications of isolated and combined herbicides on corn culture with *cp4-epsps* and *pat* genes. **Crop Protec**., v. 106, p. 156-162, 2018a.

LANDRY, R. L. et al. Glufosinate rate and timing for control of glyphosate-resistant rhizomatous johnsongrass (*Sorghum halepense*) in glufosinate-resistant soybean. **Int J Agron**., e. 8040235, 2016.

LATORRE, D. O. **Intoxicação e alterações metabólicas do algodão sensível e resistente ao amônio glufosinate**. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", UNESP, Botucatu, 2014.

LEPPING, M. D. et al. Compositional equivalence of DAS-444Ø6-6 (AAD-12+-

2mEPSPS+PAT) herbicide-tolerant soybean and nontransgenic soybean. **J Agric Food Chem**., v. 61, n. 46, p. 11180-11190, 2013.

MANLEY, B. S. et al. Weed management and crop rotations influence populations of several broadleaf weeds. **Weed Sci**., v. 49, n. 1, p. 106-122, 2001.

MANTOVANI, E. E. et al. Characterization of soybean population with sulfonylurea herbicides tolerant alleles. **Afr J Agric Res**., v. 12, n. 19, p. 1661-1668, 2017.

MASCHHOFF, J. R. et al. Effect of ammonium sulfate on the efficacy, absorption, and translocation of glufosinate. **Weed Sci**., v. 48, n. 1, p. 2-6, 2000.

MAY, O. L. et al. Transgenic cotton with improved resistance to glyphosate herbicide. **Crop Sci**., v. 44, n. 1, p. 234-240, 2004.

MENENDEZ, J. et al. Resistance to chlortoluron of a slender foxtail (*Alopecurus myosuroides*) biotype. **Weed Sci**., v. 42, n. 3, p. 340-344, 1994.

MENESES, V. G. et al. Arroz-vermelho (*Oryza sativa*) resistentes aos herbicidas imidazolinonas. **Planta Daninha**, v. 27, n. 5, p. 1047-1052, 2009.

MENESES, V. G. et al. Associação de glyphosate e imidazolinonas no controle de arroz-vermelho em arroz Clearfield®. **Cienc Rural**., v. 43, n. 12, p. 2154-2159, 2013.

MEROTTO JÚNIOR, A. et al. Effects of glyphosate and foliar application of micronutrients in transgenic soybean. **Biosci J.**, v. 31, n. 2, p. 499-508, 2015.

MEYER, C. J. et al. Herbicide Program approaches for managing glyphosate-resistant palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*) and waterhemp (*Amaranthus tuberculatus and Amaranthus rudis*) in future soybean-evento technologies. **Weed Technol**., v. 29, n. 4, p. 716-729, 2015.

MIAN, M. A. R. et al. RFLP Analysis of chlorimuron ethyl sensitivity in soybean. **J**

Heredity, v. 88, n. 1, p. 38-41, 1997.

MILLER, M. R.; NORSWORTHY, J. K. Evaluation of herbicide programs for use in a 2,4-D-resistant soybean technology for control of glyphosate-resistant palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*). **Weed Technol**., v. 30, n. 2, p. 366-376, 2016.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - MAPA. **Consulta de ingrediente ativo**. 2019. Disponível em: <http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/!ap_ing_ativo_detalhe_cons?p_id_ingrediente_ativo=134>. Acesso em: 15 mai. 2019.

MONTGOMERY, G. B. et al. Effect of time of day of application of 2,4-D, dicamba, glufosinate, paraquat, and saflufenacil on horseweed (*Conyza canadensis*) control. **Weed Technol**., v. 31, n. 4, p. 550-556, 2017.

MORENO, G. et al. Bioenergetics potential of RR2 PRO transgenic soybean subjected to application of herbicides isolated and in combination. **Braz Arch Biol Technol**., v. 61, e. 18000260, 2018.

MORENO, G. et al. Vigor das sementes de soja Cultivance submetidas a diferentes doses e épocas de aplicação de herbicida do grupo das imidazolinonas. In: XX Congresso Brasileiro de Sementes, 2017, Foz do Iguaçu. **Anais**. Londrina: ABRATES, 2017, 1p.

NANDULA, V. et al. Response of soybean to halosulfuron herbicide. **Int J Agron**., e. 754510, 2009.

NARDI, R. **Manejo de dessecação pré-semeadura da soja no controle de** *Conyza spp*. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Paraná, Palotina, 2015.

NOLTE, S. A.; YOUNG, B. G. Efficacy and economic return on investment for conventional and herbicide-resistant soybean (*Glycine max*). **Weed Technol**., v. 16, n. 2,

p. 388-395, 2002.

OLIVEIRA JÚNIOR, R. S. Mecanismos de ação de herbicidas. In: CONSTANTIN, J.; INOUE, M. H.; OLIVEIRA JÚNIOR, R. S. **Biologia e manejo de plantas daninhas**. Curitiba: Editora Omnipax, 2011, p.141-192.

OLIVEIRA NETO, A. M. et al. Manejo de *Conyza bonariensis* com glyphosate + 2,4-D e amônio-glufosinate em função do estádio de desenvolvimento. **Rev Bras Herb**., v. 9, n. 3, p. 73-80, 2010.

OSIPE, J. B. et al. Spectrum of weed control with 2,4-D and dicamba herbicides associated to glyphosate or not. **Planta Daninha**, v. 35, e. 017160815, 2017.

OSÓRIO, C. W. et al. Milho RR submetido a diferentes manejos de herbicidas e adubação foliar. **Nativa**, v. 3, n. 2, p. 78-82, 2015.

OWEN, M. et al. Weed management programs using Roundup Ready Xtend and LibertyLink soybean. **Farm Progress Rep**., v. 1, 131 p., 2018.

PENCKOWSKI, L. H.; PODOLAN, M. J.; LÓPES-OVEJERO, R. F. Tolerância de milho tratado com inseticidas a herbicidas do grupo das imidazolinonas. **Planta Daninha**, v. 22, n. 2, p. 307-313, 2004.

PEREIRA, R. C.; CARMONA, R. Seletividade e eficácia de misturas de herbicidas do grupo das imidazolinonas em milho tolerante. **Rev Bras Herb**., v. 1, n. 1, p. 45-52, 2000.

PEREIRA, V. G. C. **Desempenho agronômico da soja Cultivance® submetida a doses de Soyvance® em pós emergência**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Paraná, Palotina, 2016.

PEREIRA, V. G. C. et al. Aplicação de doses do herbicida Soyvance® em pós-emergência sobre o desenvolvimento da soja Cultivance®. In: XXX Congresso Brasileiro

de Ciências das Plantas Daninhas, **Anais**. Londrina: SBCPD, 2016b,1p.

PEREIRA, V. G. C. et al. Efeito de doses de imazapir + imazapic em pós emergência sobre o desenvolvimento da soja Cultivance®. In: XXX Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas, Curitiba. **Anais**. Londrina: SBCPD, 2016a, 1p.

PETERSON, D. E. et al. Sequential weed control programs in no-tillage Xtend soybeans. **Kansas A E S Res Rep**., v. 3, 24 p., 2017.

PETERSON, M. A. et al. 2,4-D past, present, and future: a review. **Weed Technol**., v. 30, n. 2, p. 303-345, 2016.

PLINE, W. A. et al. Reproductive abnormalities in glyphosate-resistant cotton caused by lower CP4-EPSPS levels in the male reproductive tissue. **Weed Sci**., v. 50, n. 4, p. 438-447, 2002.

PLINE-SRNIC, W.A. et al. Effect of glyphosate on fruit retention, yield, and fiber quality of glyphosate resistant cotton. **J Cotton Sci**., v. 8, n. 1, p. 24-32, 2004.

REDDY, K. N. et al. Glyphosate effect on shikimate, nitrate reductase activity, yield, and seed composition in corn. **J Agric Food Chem**., v. 58, n. 6, p. 3646-3650, 2010.

REDDY, K. N., Whiting K. Weed control and economic comparisons of glyphosate--resistant, sulfonylurea-tolerant, and conventional soybean (*Glycine max*) systems. **Weed Technol**., v. 14, n. 1, p. 204-211, 2000.

REED, J. D. et al. Palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*) management in GlyTol® LibertyLink® cotton. **Weed Technol**., v. 28, n. 4, p. 592-600, 2014.

REIS, M. R. et al. Micorrização, nodulação e produção da soja roundup ready após a aplicação de diferentes formulações de glyphosate. **Planta Daninha,** v. 32, n. 3, p. 563-569, 2014.

REIS, T. C. et al. Efeitos de fitotoxidade na soja RR tratada com formulações e dosagens de Glifosato. **Rev Biol Cienc Terra**., v. 10, n. 1, p. 34-43, 2010.

RITTER, R.L., Menbere H. Weed management systems utilizing glufosinate-resistant corn (*Zea mays*) and soybean (*Glycine max*). **Weed Technol**., v. 15, n. 1, p. 89-94, 2001.

ROBINSON, A. P. et al. Response of aryloxyalkanoate dioxygenase-12 transformed soybean yield components to postemergence 2,4-D. **Weed Sci**., v. 1, n. 63, p. 242-247, 2015.

RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. S. **Guia de Herbicidas**. 7. ed. Londrina: Edição dos autores, 2018.

ROGOZIN, I. B. et al. The effect of the primary structure of DNA on induction of mutations by alkylating agents. **Russ J Genet**., v. 6, n. 37, p. 704-710, 2001.

ROSO, A. C.; VIDAL, R. A. Culturas resistentes aos herbicidas inibidores da enzima ALS: revisão de literatura. Pestic: **Rev Ecotoxicol Meio Amb**., v. 21, p. 13-24, 2011.

RUEN, D. C. et al. Tolerance of corn with glyphosate resistance and the aryloxyalkanoate dioxygenase trait (AAD-1) to 2,4-D choline and glyphosate. **Weed Technol**., v. 31, n. 2, p. 217-224, 2017.

SANTOS, J. B. et al. Avaliação de formulações de glyphosate sobre soja Roundup Ready. **Planta Daninha**, v. 25, n. 1, p. 165-171, 2007.

SAUER, H. et al. The effect of phosphinotricin (glufosinate) on photosynthesis. II. The causes of inhibition of cell photosynthesis. **Biosciences**, v. 42, n. 3, p. 270-278, 1987.

SCHRYVER, M. G. et al. Control of glyphosate-resistant common waterhemp (*Amaranthus rudis*) in three new herbicide-resistant soybean varieties in Ontario. **Weed**

Technol., v. 31, n. 6, p. 828-837, 2017.

SEBASTIAN, A. S. et al. Semidominant soybean mutation for resistance to sulfonylurea herbicides. **Crop Sci**., v. 29, n. 6, p. 1403-8, 1989.

SILVA, A. F. M. et al. Application of post-emergence als inhibitor herbicides associated or not to glyphosate in RR/STS soybean. **Planta Daninha**, v. 34, n. 4, p. 765-775, 2016.

SILVA, A. F. M. et al. Glyphosate in agronomic performance and seed quality of soybean with *cp4-EPSPs* and *cry1Ac* genes. **J Plant Prot Res**., v. 58, n. 4, p. 345-352, 2018a.

SILVA, A. F. M. et al. Glyphosate, isolated or in associations, at agronomic performance and seed quality of the RR® 2 soybean. **Arq Inst Biol**., v. 85, e. 0732017, 2018b.

SILVA, A. F. M. et al. Rates of nicosulfuron applied in glyphosate-tolerant and sulfonylurea-tolerant soybean. **Planta Daninha**, v. 37, e. 019188317, 2019.

SILVA, A. F. M. et al. Selectivity of nicosulfuron isolated or in tank mixture to glyphosate and sulfonylurea tolerant soybean. **J Plant Prot Res**., v. 58, n. 2, p. 152-160, 2018c.

SILVA, A. F. M. et al. Seletividade de herbicidas isolados e em associações para milho RR2/LL®. **Rev Bras Herb**., v. 16, n. 1, p. 60-66, 2017.

SILVA, L. **Manejo de plantas daninhas dicotiledôneas na cultura da soja (*Glycine max L.* Merrill)**. 2011. Dissertação (Mestrado). Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2011.

SUDIANTO, E. et al. Clearfield® rice: Its development, success, and key challenges on a global perspective. **Crop Prot**., v. 49, p. 40-51, 2013.

THELEN, K. D.; PENNER, D. Yield environment affects glyphosate-resistant hybrid response to glyphosate. **Crop Sci.**, v. 47, n. 5, p. 2098-2107, 2007.

ULBRICH, A.V. et al. Efeito residual dos herbicidas imazaquin e imazetaphyr, aplicados na soja, sobre o milho safrinha. **Planta Daninha**, v. 16, n. 2, p. 137-147, 1998.

UNDERWOOD, M. G. et al. The addition of dicamba to POST applications of quizalofop-p-ethyl or clethodim antagonizes volunteer glyphosate-resistant corn control in dicamba-resistant soybean. **Weed Technol**., v. 30, n. 3, p. 639-647, 2016.

VANN, R. A. et al. Effect of delayed dicamba plus glufosinate application on palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*) control and Xtendflex™ cotton yield. **Weed Technol**., v. 31, n. 5, p. 633-640, 2017.

VIEIRA JÚNIOR, N. S. et al. Associação de herbicidas aplicados em pós-emergência na cultura do milho. **Gl Sci Technol**., v. 8, n. 1, p. 1-8, 2015.

VILA-AIUB, M. M. et al. Glyphosate-resistant weeds of South American cropping systems: an overview. **Pest Manag Sci**., v. 64, n. 4, p. 366-371, 2008.

WALLACE, R. D. et al. Tolerance of GlyTol® and GlyTol® + LibertyLink® cotton to glyphosate and glufosinate in the southeastern US. **J Cotton Sci**., v. 15, n. 1, p. 80–88, 2011.

WALTER, K. L. et al. Molecular and phenotypic characterization of Als1and Als2 mutations conferring tolerance to acetolactate synthase herbicides in soybean. **Pest Manag Sci**., v. 70, n. 12, p. 1831-9, 2014.

WIGGINS, M. S. et al. Cover crop and postemergence herbicide integration for palmer amaranth control in cotton. **Weed Technol**., v. 31, n. 3, p. 348-355, 2017.

WRIGHT, S. D. et al. Glufosinate safety in WideStrike® acala cotton. **Weed Technol**.,

v. 28, n. 1, p. 104-110, 2014.

ZOBIOLE, L. H. S. et al. Effect of glyphosate on symbiotic N2 fixation and nickel concentration in glyphosate-resistant soybeans. **Applied Soil Ecol**., v. 44, n. 2, p. 176-180 2010a.

ZOBIOLE, L. H. S. et al. Glyphosate affects chlorophyll, nodulation and nutrient accumulation of "second generation" glyphosate-resistant soybean (*Glycine max* L.). **Pestic Biochem Physiol**. v. 99, n. 1, p. 53-60, 2011.

ZOBIOLE, L. H. S. et al. Glyphosate reduces shoot concentrations of mineral nutrients in glyphosate-resistant soybeans. **Plant Soil**., v. 328, n. 1-2, p. 57-69, 2010c.

ZOBIOLE, L. H. S. et al. Water use efficiency and photosynthesis of glyphosate-resistant soybean as affected by glyphosate. **Pestic Biochem Physiol**., v. 97, n. 3, p. 182-193, 2010b.

MATOLOGIA

Estudos **sobre** plantas **daninhas.**

ARTHUR
Arrobas Martins
Barroso

AFONSO
Takao Murata

Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas
(Brazilian Weed Science Society)
SBCPD

UFPR
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RPM

Departamento de Fitotecnia e Fitossanidade

PLATAFORMA INTACTA 2 XTEND

FÁBRICA DA PALAVRA